

Treball de Fi de Màster
Màster Universitari en Tecnologies Industrials

Estudi del sentit del desviament del sistema elèctric amb models predictius

MEMÒRIA

Autor:	Eduard Cirera Riu
Director/s:	Eduardo Prieto i Pol Olivella
Convocatòria:	Juny 2018

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
Industrial de Barcelona



Resum

El projecte comprèn un estudi del sentit del desviament de generació-demanda del sistema elèctric, així com una proposta de model predictiu d'aquest sentit per poder ajustar la compra de les pròximes hores en conseqüència, des de la referència de la comercialitzadora elèctrica.

Primerament, s'estudia el funcionament del mercat elèctric espanyol i els agents que hi participen, de tal manera que s'entengui el paper de la comercialitzadora elèctrica i la importància que té per ella el cost del desviament.

Tot seguit, s'aprofundeix en els mercats d'ajustament de generació per tal d'entendre el procés físic i econòmic que té lloc de forma contínua per tal que es garanteixi un subministrament segur i de qualitat. També és important per entendre el perquè d'aquest cost del desviament i tenir present quins factors s'hi inclouen.

A continuació, es fa un estudi, mitjançant el programa Minitab, de les variables físiques i econòmiques que poden influenciar de forma significativa en què el sistema es desvii cap un sentit o cap un altre. S'arriba a la conclusió que el més important és la quantitat de generació de cada tipus i, en menor mesura, les bandes de regulació secundària.

A més, s'ha realitzat un estudi de les variables temporals en base la teoria de les series temporals. S'observa que hi ha certa tendència a programar menys generació del que realment es consumeix en els mesos d'estiu i en les hores de nit.

Després de realitzar uns primers models no satisfactoris, s'arriba a la conclusió que cal una eina més potent per fer la predicció. Així doncs, es planteja fer servir un algoritme de *Machine Learning* mitjançant llenguatge Python. Per tal d'utilitzar-lo, es manipulen i es transformen les dades adequadament per obtenir millors resultats. S'assoleixen, d'aquesta manera, prediccions que superen el 80% d'encerts, per la qual cosa es considera que s'ha assolit l'objectiu.

Per acabar, es fa una valoració i es contemplen diferents opcions per tal de seguir millorant el model.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. PREFACI	5
1.1. Origen del projecte i motivació	5
2. INTRODUCCIÓ	6
2.1. Objectius del projecte	6
2.2. Abast del projecte	6
3. FUNCIONAMENT DEL MERCAT ELÈCTRIC	8
3.1. Fluxos del sistema elèctric	8
3.2. Els agents del sistema elèctric	9
3.2.1. Generació	9
3.2.2. Transport	10
3.2.3. Distribució	10
3.2.4. Comercialització	11
3.3. El mercat diari	12
3.3.1. La cassació de preus	12
3.3.2. Els mercats intradiaris	14
3.3.3. La corba de demanda	16
3.4. Els costos de la comercialitzadora	17
3.4.1. Costos de l'Operador del Mercat (OM)	17
3.4.2. Costos de l'Operador del Sistema (OS)	17
3.4.3. Altres costos	18
3.5. El cost de desviament	19
4. MERCATS DE SERVEIS D'AJUSTAMENT DE GENERACIÓ I DEMANDA	20
4.1. Solució de restriccions tècniques i publicació del Programa Diari Viable Provisional (PDVP)	21
4.2. Mercat de potència addicional a pujar	22
4.3. Mercats de regulació i balanç	22
4.3.1. Regulació primària	22
4.3.2. Regulació secundària i publicació del Programa Horari Final (PHF)	22
4.3.3. Regulació terciària i publicació del Programa de Tancament (P48)	24

4.4.	Mercat de gestió de desviaments	25
4.5.	Energia ajustada i sentit de desviament contrari al sistema.....	26
5.	ESTUDI DE VARIABLES INFLUENTS I POSSIBLES PATRONS ____	31
5.1.	MINITAB i estudi ANOVA	31
5.2.	Variables categòriques i numèriques.....	32
5.3.	Variables d'estudi.....	32
5.3.1.	Variables de resposta	32
5.3.2.	Variables predictives.....	32
5.3.2.1.	Tipus de generació	33
5.3.2.1.1	..... Significança entre generació eòlica i sentit	35
5.3.2.1.2	.....Significança entre generació hidràulica i sentit	36
5.3.2.1.3	.....Significança entre generació de carbó i sentit.	37
5.3.2.1.4	... Significança entre generació de cicle combinat i sentit	39
5.3.2.1.5	.....Significança entre la generació nuclear i el sentit	40
5.3.2.1.6	.....Significança entre cogeneració i sentit	41
5.3.2.2.	Preu del mercat diari, OMIE.....	43
5.3.2.3.	Demanda	45
5.3.2.4.	Banda de regulació secundària.....	46
5.3.2.4.1	.....Significança entre la banda a pujar i sentit	46
5.3.2.4.2	.....Significança entre la banda a baixar i el sentit	48
5.3.2.5.	Interconnexions amb França.....	49
5.3.2.5.1	..... Significança entre l'exportació a França i el sentit	49
5.3.2.5.2	..... Significança entre la importació de França i el sentit	51
5.4.	Conclusions de l'anàlisi estadística.....	52
6.	SÈRIES TEMPORALS I PRIMERS MODELS _____	54
6.1.	Sèries temporals	54
6.1.1.	Estacionalitat: estudi de variables temporals.....	56
6.1.1.1.	Mes de l'any	57
6.1.1.2.	Dia tipus de la setmana.....	57

6.1.1.3. Hora del dia.....	58
6.1.2. Regressió lineal múltiple mitjançant Minitab	60
6.1.3. Tendència i autocorrelació.....	61
6.2. Conclusions de l'estudi temporal.....	63
7. MODELS PREDICTIUS: MACHINE LEARNING	65
7.1. Introducció al <i>Machine Learning</i>	65
7.2. Algoritmes de <i>Machine Learning</i>	66
7.2.1. Arbres de decisió	67
7.2.2. Algoritme escollit: <i>Random Forest</i>	69
7.3. Model predictiu del sentit del desviament	69
7.3.1. Dades horàries disponibles, models horaris	70
7.3.2. Diagrama de blocs del model	71
7.3.3. Resultats.....	74
7.3.3.1. Model sessió intradiària 2	74
7.3.3.2. Model sessió intradiària 3	75
7.3.3.3. Model sessió intradiària 4	77
7.3.3.4. Model sessió intradiària 5	78
7.3.3.5. Model sessió intradiària 6	79
7.3.3.6. Model sessió intradiària 7	81
8. POSSIBLE IMPLEMENTACIÓ A UNA COMERCIALITZADORA ____	83
8.1. Impacte econòmic	83
8.1.1. Pressupost.....	85
8.2. Impacte ambiental	86
9. CLOENDA.....	87
9.1. Conclusions	87
9.2. Oportunitats de millora.....	88
AGRAÏMENTS	89
REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	90

ANNEX I

ANNEX II

1. Prefaci

L'any 1997, amb l'aplicació de la Llei 54/1997 del Sector Elèctric, es va iniciar un procés de liberalització del sistema elèctric, en què una bona part de les gestions com la generació i els preus s'introduïen en mecanismes de mercat [1].

És en aquest context de liberalització quan el mercat elèctric esdevé atractiu i amb més oportunitats, per la qual cosa comencen a aparèixer múltiples comercialitzadores elèctriques en lliure competència.

1.1. Origen del projecte i motivació

Després de realitzar les pràctiques curriculars a Aura Energia, comercialitzadora elèctrica, es va presentar la possibilitat de fer-hi també el projecte. Aquest tractaria de realitzar un estudi del sentit del desviament del sistema elèctric amb models predictius, per tal de preveure el comportament del sistema en les hores futures i modificar, en conseqüència, la quantitat d'energia comprada.

El projecte ha estat motivat principalment per l'estalvi en costos de desviament que podria generar a Aura Energia. A més, ha estat una bona oportunitat per aprofundir en els coneixements sobre el funcionament del sistema elèctric.

Per tal de fer aquest estudi ha estat necessari aplicar els coneixements sobre el sector adquirits durant les pràctiques, així com recuperar conceptes d'estadística i aprendre nocions de *Machine Learning* amb Python.

2. Introducció

A dia d'avui, l'energia elèctrica no es pot emmagatzemar a gran escala, i és per això que resulta imprescindible mantenir un equilibri entre la generació i la demanda en cada instant.

Red Eléctrica de España, empresa que actua com a Operador del Sistema elèctric, s'encarrega, entre altres coses, d'adaptar contínuament els programes de producció amb el consum que finalment es realitza. Aquest servei es basa, doncs, en corregir els desviaments i fer que aquestes correccions siguin tècnicament viables, garantint així l'equilibri esmentat i complint les condicions de qualitat i seguretat requerides pel subministrament.

2.1. Objectius del projecte

Aquests serveis d'ajustament tenen un cost associat que Red Eléctrica de España trasllada a les comercialitzadores, ja que són aquestes les responsables de preveure el consum dels seus clients. Aquest cost de desviament és propi per cada comercialitzadora elèctrica i, per tant, mitjançant millores dels algorismes de compra i fent millors previsions es pot aconseguir reduir-lo.

Així doncs, per Aura Energia, podria resultar interessant poder preveure en cada moment el sentit en què la generació i la demanda es desviaran (abans dels serveis d'ajustament) en les pròximes hores, és a dir, si la generació supera el consum o viceversa.

L'objectiu del projecte és, doncs, realitzar un estudi mitjançant dades històriques del comportament d'aquest sentit de desviament, cercant possibles patrons en funció dels molts altres factors que intervenen en el sistema elèctric i poder crear un model predictiu per tal de preveure aquest sentit en les hores futures.

2.2. Abast del projecte

Per realitzar aquest estudi s'han fet servir dades horàries històriques publicades a Red Eléctrica. Aquestes dades, un cop manipulades adequadament, s'han usat per trobar patrons mitjançant programes d'estadística i visualització com el Minitab i el Qlik Sense, de totes maneres, el model predictiu s'ha acabat fent amb algorismes de *Machine Learning* amb llenguatge Python.

En qualsevol cas, però, no s'ha aprofundit en el funcionament d'aquests programes ni algorismes, s'han fet servir com a eina per aconseguir una finalitat. Cal dir, doncs, que la major

part de càrrega ha estat l'adquisició, interpretació i manipulació de les dades i dels resultats, ja que per això fan falta estudis i coneixements previs perquè els models siguin efectius.

3. Funcionament del mercat elèctric

3.1. Fluxos del sistema elèctric

El sistema elèctric està format per dos fluxos, l'econòmic i el físic, units per la producció i el consum. El transport i la distribució s'inclouen en el flux físic i, l'OMIE (Operador del Mercado Ibérico de la Energía) i la comercialització, en l'econòmic.

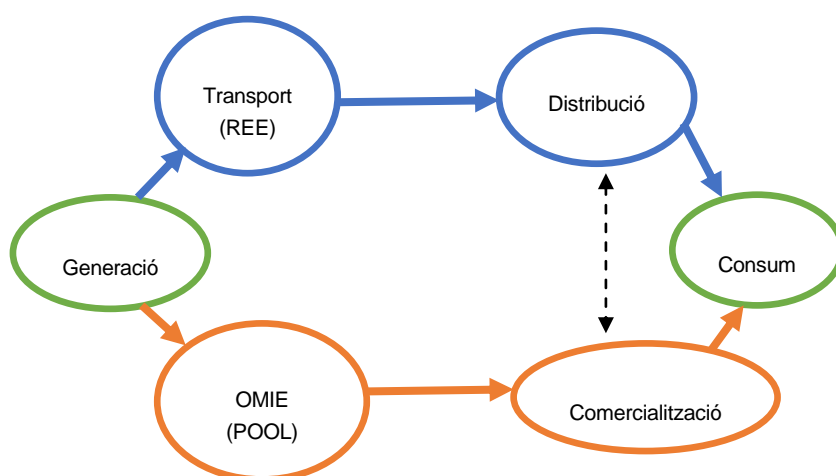


Figura 3.1. Diagrama de fluxos del sistema elèctric. El flux físic representat de color blau i, l'econòmic, en taronja. La generació i el consum es representen d'un altre color perquè són els agents que marquen el funcionament d'ambdós fluxos. La fletxa discontinua pretén representar el contacte constant entre comercialitzadores i distribuïdores per dur a terme les tasques d'intermediació. - Font: elaboració pròpia.

També és important diferenciar aquests agents per la seva condició en el mercat. Tant el transport com la distribució estan regulats, essent Red Eléctrica de España l'entitat responsable del primer i les cinc empreses que exerceixen monopoli en el territori de l'Estat, les responsables del segon. La generació i la comercialització, però, estan liberalitzades, és a dir, funcionen amb mecanismes de mercat.



Figura 3.2. Agents del sistema elèctric. En blau s'indiquen els agents regulats i, en verd, els liberalitzats. – Font: [2]

3.2. Els agents del sistema elèctric

3.2.1. Generació

La duem a terme els productors, que són aquells agents encarregats de generar l'electricitat a partir d'un determinat recurs energètic. A dia d'avui existeixen diverses alternatives amb característiques molt variades, a continuació es descriuen les més usades a la península ibèrica [1].

Les més tradicionals es basen en els recursos fòssils com el carbó o el gas natural. Compten amb l'avantatge de poder regular el seu nivell de generació per acoblar-se al consum i de forma ràpida i eficaç, per la qual cosa es pot dir que són tipus de generació fàcilment gestionables, depenent únicament del preu del recurs natural. L'energia nuclear també explota una matèria primera no renovable, l'urani, de totes maneres, i tot i no acumular gasos d'efecte hivernacle, és un tipus d'energia poc gestionable, ja que les centrals nuclears no són capaces de regular la seva potència amb facilitat i, en canvi, generen de forma constant, per la qual cosa és considerada com a potència de base.

Per altra banda, les energies renovables estan basades en recursos que no s'esgoten. La més usada tradicionalment és la hidràulica, la qual és una font fàcilment gestionable quan els embassaments estan plens, per la qual cosa també sol facilitar l'acoblament entre generació i consum. En canvi, la generació eòlica no és fàcilment gestionable a causa de la variabilitat del seu recurs natural, de totes maneres, participa en gran mesura a la producció total de la península.

També hi ha generació vinculada a la indústria com ara la cogeneració, que es basa en l'aprofitament de la calor residual dels cicles combinats. També és considerada, com l'energia nuclear, potència de base.

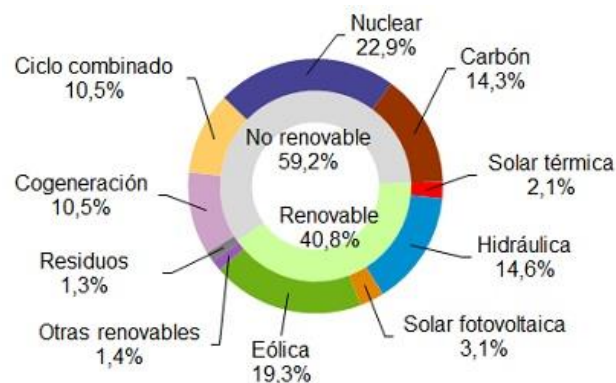


Figura 3.3. Proporció de la generació elèctrica segons tipologia a l'Estat espanyol durant l'any 2016. – Font: [3]

3.2.2. Transport

El transport consisteix, com el seu propi nom indica, en transportar l'electricitat que han generat els agents productors. Aquest concepte es reserva per distàncies llargues mitjançant línies d'alta tensió [1].

Actualment, l'empresa encarregada del transport és Red Eléctrica de España (REE) i és una entitat pública, majoritàriament. REE també és la responsable de què el sistema funcioni de forma correcta i segura, amb la màxima de què ningú es pot quedar sense subministrament en cap moment. Un dels serveis que dona és, doncs, els serveis d'ajustament, els quals seran estudiats amb deteniment en aquest treball.

3.2.3. Distribució

La distribució és el transport en mitjana i baixa tensió. Un cop l'energia arriba als seus consums, la distribució és la responsable de les instal·lacions que permeten el subministrament a les càrregues, mitjançant cablejat i comptadors, entre altres [1].

La distribució està repartida en forma de monopoli en els diferents territoris de l'Estat espanyol. A la Figura 3.4 es mostren les principals empreses distribuïdores i el seu repartiment en el territori, tot i que n'hi ha d'altres més petites.



Figura 3.4. Mapa d'actuació de les distribuïdores principals en el territori de l'Estat espanyol. – Font: [1]

3.2.4. Comercialització

Organitzativament, l'adquisició d'energia es duu a terme en dos mercats: el minorista, on els consumidors domèstics i petites empreses firmen un contracte lliure amb una de les comercialitzadores en règim de lliure competència i que els factura l'electricitat consumida, i el mercat majorista, en què les comercialitzadores i els grans consumidors adquireixen directament l'energia als productors mitjançant mecanismes de mercat [1]. S'observa, per tant, que les comercialitzadores realitzen un paper d'intermediari administratiu entre la generació i el petit consumidor, com a compradores en el mercat majorista i com a venedores en el minorista. En el dia a dia de la comercialització s'intenta millorar la previsió del consum dels seus clients per tal de realitzar una compra més acurada.

ESQUEMA DEL SISTEMA ELÉCTRICO PENINSULAR

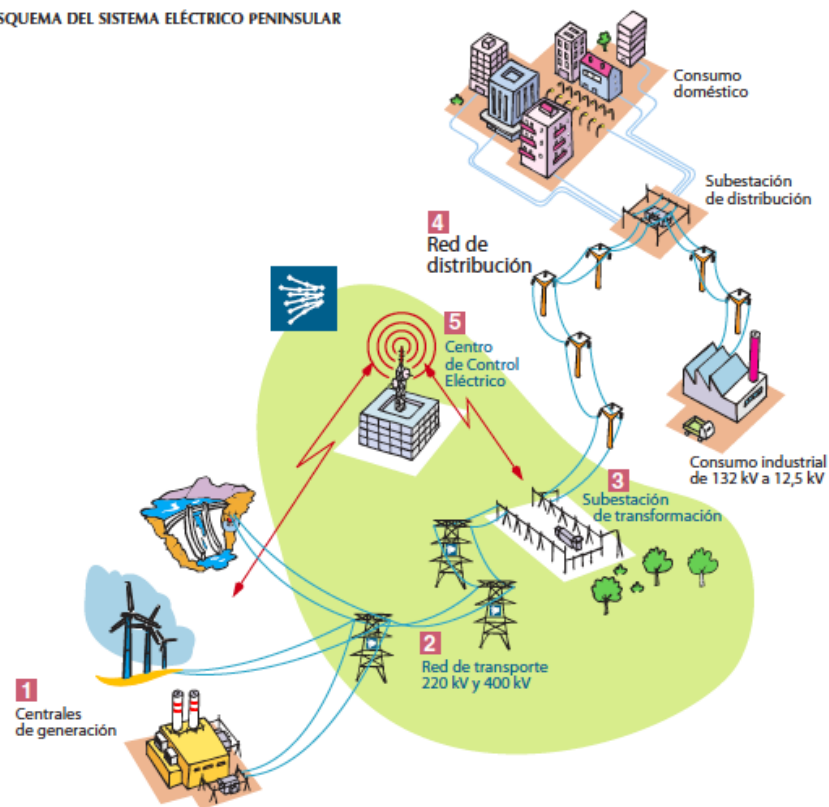


Figura 3.5. Esquema del flux físic del sistema elèctric on s'hi expliciten els agents que hi participen. – Font: [2]

3.3. El mercat diari

En aquest apartat es descriuen els mecanismes en què els productors i els consumidors acorden un preu i unes quantitats d'energia a intercanviar. Aquests mecanismes (mercats) consisteixen en una sèrie de procediments per l'intercanvi d'informació entre productors i consumidors de manera que aquells productors disposats a generar al menor preu abasteixin a aquells consumidors disposats a pagar-lo. Tot això sota la principal restricció del sistema que dicta que la generació i el consum han d'ajustar-se en tot moment.

Existeixen varis mecanismes o mercats a través dels quals es pot acordar el preu esmentat:

- Mercats no organitzats: són contractes bilaterals (estables en preus i quantitats) que acorden un productor i un consumidor de forma directa per un període de temps determinat [1].
- Mercats de producció diaris i intradiaris (mercat spot), que organitza l'OMIE (Operador del Mercado Ibérico de la Energía). Són mercats horaris on es decideixen preus i quantitats per totes les hores de l'any [1].
- Una altra sèrie de mercats que gestiona REE orientats a organitzar els ajustaments d'última hora per assegurar l'esmentat equilibri instantani entre generació i consum: mercats de serveis complementaris, solució de restriccions tècniques, gestió de desviaments, etc. Aquests mecanismes són els que s'estudien amb deteniment en aquest projecte [1].

3.3.1. La cassació de preus

L'objectiu del mercat diari és el de definir el preu i les quantitats d'energia que els productors deixaran anar a la xarxa elèctrica i els consumidors absorbiran d'ella durant una determinada hora. Aquest mercat es realitza cada dia, de manera que sobre les 14h del dia D-1 es fixa un preu de l'electricitat comú per tots els participants per cada una de les 24 hores del dia D, així com quin productor produirà i a quina potència en cada una d'aquestes hores.

Sobre les 12h del dia D-1, OMIE ha rebut totes les ofertes de productors i consumidors. El que fa llavors és generar, per cada hora, les corbes agregades d'oferta i demanda ordenant, per trams de menor a major, totes les ofertes de generació i per trams de major a menor totes les ofertes d'adquisició.

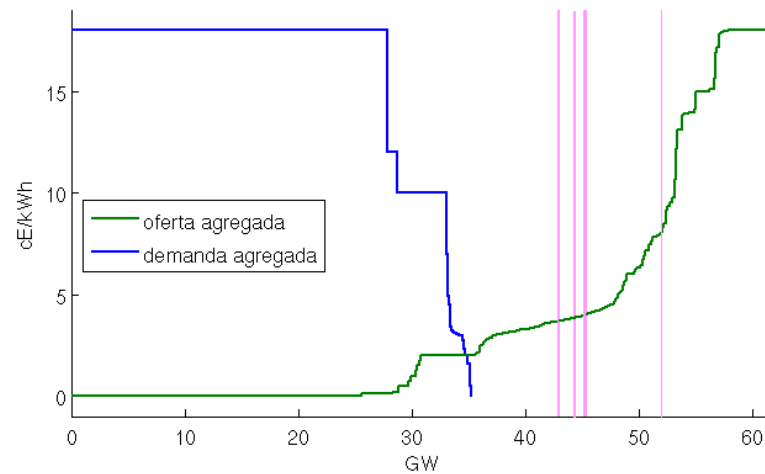


Figura 3.6. Corbes agregades d'oferta i demanda per l'hora H15 del 2 de juny de 2009. Les bandes verticals senyalen quatre trams d'una oferta realitzada per una central de cycle combinat que, en aquest cas, no haurà de generar energia, ja que la seva oferta ha quedat a la dreta del punt de tall de les corbes. – Font: [1]

És important indicar que, si bé hi ha unitats productores que ofereixen a un preu menor que el preu de cassació, a totes elles se'ls retribueix al mateix preu. Igualment, tot i que els consumidors puguin oferir a major preu (un màxim de 18,3 c€/kWh), finalment paguen el kWh al preu de cassació. D'aquesta manera es pot afirmar que el sistema del mercat diari és marginalista. Cal veure, també, que perquè aquest sistema sigui viable i es puguin acoblar la generació i el consum, les previsions de les comercialitzadores són imprescindibles.

Si s'observa la Figura 3.6, es nota que hi ha ofertes de generació a preu zero, i a mesura que la potència requerida augmenta, el preu que s'ofereix també puja. Això és degut a les diferències entre tecnologies de generació.

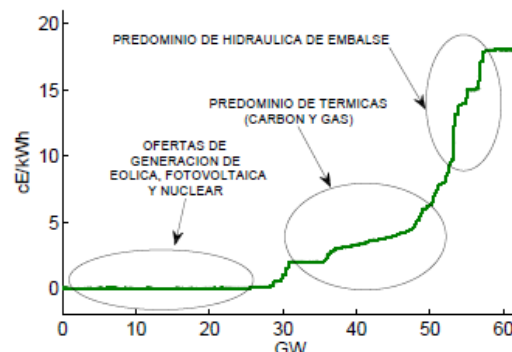


Figura 3.7. Posició típica de les diferents tecnologies de generació en la corba d'oferta del mercat diari. – Font: [1]

Tal i com es mostra a la figura 3.7, l'energia nuclear és la més barata, això és degut a que és considerada potència de base, la seva producció és constant degut a la seva dificultat per ser gestionada, a més, l'eòlica també s'ofereix barata a causa de la seva indisponibilitat d'estoc, la qual cosa implica un cost d'oportunitat nul, a diferència de, per exemple, la hidràulica. Aquest fet implica que hi hagin centrals que es vegin obligades tècnicament a vessar energia a la xarxa i, per tant, s'han d'assegurar l'entrada a la cassació mitjançant aquestes ofertes. Cal veure que les energies gestionables es reserven per moments en què s'exigeixi més potència, així com la hidràulica.

Per altra banda, també existeix un diferencial a la corba de demanda a causa dels diferents consumidors.

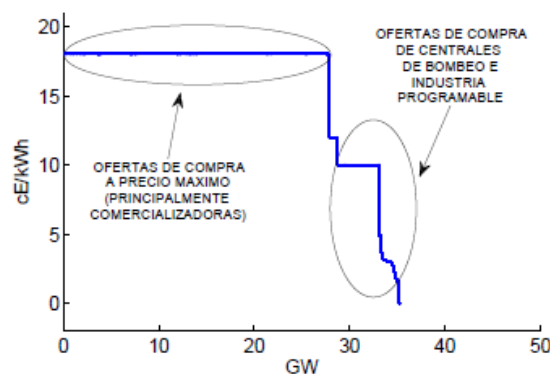


Figura 3.8. Posició típica dels diferents consumidors en la corba de demanda del mercat diari. – Font: [1]

A la figura 3.8, es pot observar com les comercialitzadores, en general, demanden a un preu elevat, això és degut a la necessitat d'aprovisionament, ja que en cas de quedar-se fora de la cassació no podrien comprar.

Cal veure, doncs, que hi ha agents del mercat que ofereixen o demanden a certs preus mentre confien que altres tecnologies els modifiquin, això és possible perquè és un sistema marginalista.

3.3.2. Els mercats intradiaris

Aquests mercats, anomenats també com a “mercats de correcció”, estan orientats a què els participants del mercat diari puguin fer correccions als seus compromisos de producció/adquisició un cop coneguts els resultats del mercat diari. Com s'ha comentat, el

mercat diari per les 24 hores del dia D es tanca a les 12h del dia D-1, i les cassacions es coneixen sobre les 14h. Cadascun dels 6 mercats intradiaris posteriors té un termini determinat per fer ofertes sobre unes determinades hores en concret, com il·lustra la Figura 3.9

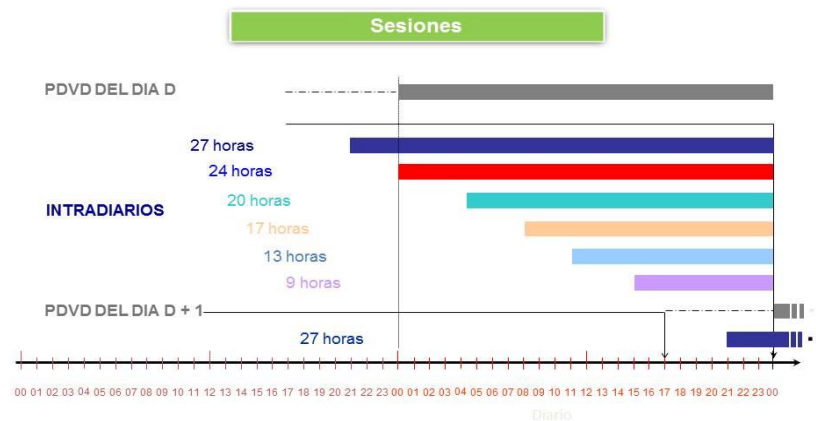


Figura 3.9. Hores del dia D que abarquen cadascún dels 6 mercats intradiaris – Font: REE

Com que es tracten de mercats de correcció, només hi poden participar aquelles unitats que prèviament han participat al diari. La principal diferència és que cada unitat, independentment de si és generadora o consumidora, pot realitzar ofertes tant de generació com d'adquisició. Així, un generador, mitjançant ofertes d'adquisició, aconsegueix reduir l'energia compromesa en el diari (si, per exemple, té un problema tècnic o canvia la predicció de vent); igualment, una unitat de compra que fa ofertes de generació aconsegueix reduir el seu compromís amb el mercat diari.

Alguns dels motius que fan necessaris aquests ajustos són:

- Les centrals que només han cassat part de l'energia que poden produir (per haver ofert alguns trams a un preu major del que finalment s'ha arribat al diari) poden oferir-los un altre cop seguint una estratègia actualitzada.
- Canvis en la predicció d'un recurs no gestionable: els parcs eòlics i les instal·lacions fotovoltaïques ofereixen en el diari la quantitat d'energia estimada mitjançant models predictius. Aquesta predicció normalment es pot millorar en el transcurs del temps, i els intradiaris permeten incloure aquestes correccions.

- Declaració d'indisponibilitat. Una central que després de cassar en el diari pateix un problema tècnic que no li permet generar, pot adquirir en els intradiaris la mateixa quantitat d'energia per deixar el seu compromís de producció a zero.

3.3.3. La corba de demanda

Per il·lustrar una mica la teoria explicada fins ara, és interessant observar les corbes de demanda, que són controlades en temps real per REE. La demanda programada és la que s'extreu dels mercats diari i intradiari, aquesta es mostra en vermell a la figura 3.10, cal notar que està discretitzada per hores, tal i com es fa la compra. De totes maneres, REE fa una previsió de la demanda a temps real i de forma contínua (en verd) que va readaptant conforme passen les hores i els mercats intradiaris, en groc es representa la demanda real que hi ha hagut.

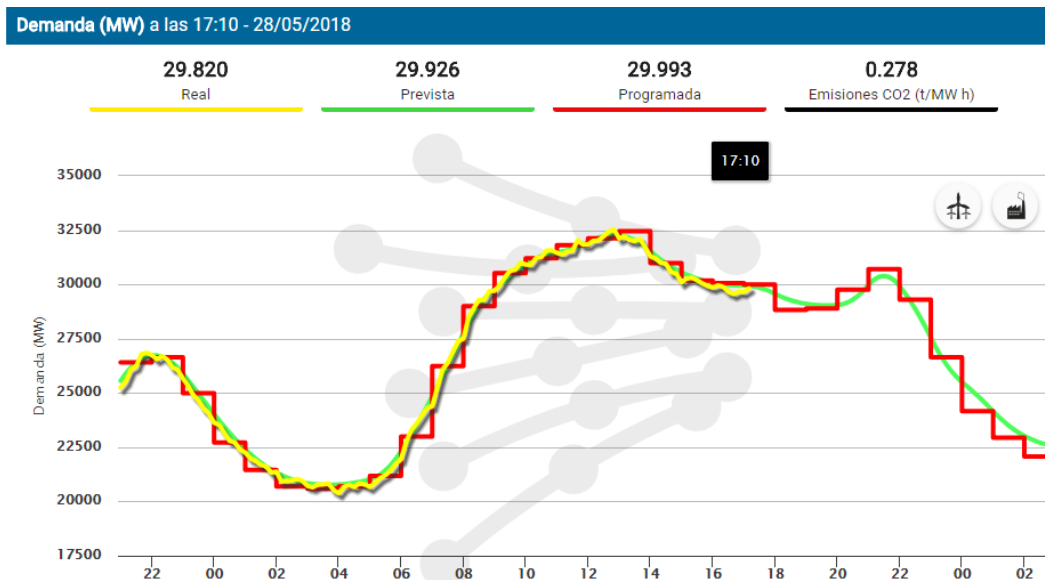


Figura 3.10. Corbes de demanda de REE. En vermell es representa la demanda programada, en verd es representa la prevista i, en groc, la real. Gràfics enregistrats el dia 28 de maig del 2018 a les 17:10h.

– Font: [3]

Si s'observen les corbes de demanda prevista i programada, es nota que hi ha hores en què la previsió no coincideix amb la programada. Per exemple, és molt probable que en l'hora H21 hi hagi desviament per major producció, és a dir, que el sistema produeixi més del que es consumeix. Això implica que s'hauran de realitzar serveis d'ajustament un cop ja s'han tancat els mercats intradiaris.

3.4. Els costos de la comercialitzadora

En aquest context, la comercialitzadora és l'encarregada de preveure el consum que tindran els seus clients per tal de realitzar la compra de l'energia que consumiran. A partir de la demanda generada per les comercialitzadores, REE preveu la producció necessària. Així doncs, el paper de la comercialitzadora és el d'intermediari entre el consum i la producció.

De totes maneres, el cost final que les comercialitzadores paguen (i que es traslladen al consumidor) no és només el de cassació a OMIE, ja que hi ha més conceptes que hi intervenen i que tot seguit es detallen.

3.4.1. Costos de l'Operador del Mercat (OM)

Són els costos derivats del flux econòmic del sistema, és a dir, de la compra d'energia. Estan formats pel cost directe de l'energia PMD (Precio Medio Diario) cassat a OMIE i la remuneració corresponent a l'estructura de l'Operador del Mercat. Tal com s'ha dit, aquest cost està liberalitzat, però és comú per a tots els participants.

3.4.2. Costos de l'Operador del Sistema (OS)

Són els costos derivats del flux físic del sistema, és a dir, els que es paguen a Red Eléctrica.

- Serveis complementaris (SSCC): serveis necessaris per assegurar el correcte subministrament elèctric. Estan associats a la producció i també estan liberalitzats segons mecanismes de mercat, de totes maneres, també són comuns per a tots els participants.
- Serveis d'interrumpibilitat: en previsió de pics de potència elevats, se subhasten, entre grans consumidors, blocs d'energia que estan disposats a deixar de consumir a canvi de certa remuneració, extreta d'aquest terme. És un cost liberalitzat (subhasta semestral) i comú per tots els participants.
- Pagaments per capacitat: cost associat al manteniment continu de centrals de cicle combinat per tal d'estar disponibles en tot moment per si hi ha pics de consum inesperats al sistema, ja que és un tipus de generació fàcilment gestionable. És un

terme regulat.

- Retribucions: remuneració a REE per realitzar el servei que fa, també és un cost regulat.
- Desviament: la comercialitzadora, al ser l'encarregada de preveure el consum dels seus clients, ha de pagar aquest terme en concepte de serveis d'ajustament pel que fa a la correcció de l'error de previsió. Aquest terme és lliure i propi de cada comercialitzadora.

3.4.3. Altres costos

- Taxa municipal: pagament que es fa als ajuntaments per tenir dret a fer servir el terreny municipal. És un cost regulat.
- Fons d'Eficiència Energètica (FEE): recaptació que fa l'Estat per dur a terme mesures per fomentar l'eficiència energètica. És un concepte regulat i es paga al Ministeri.
- Peatge d'accés: terme que es paga a la distribuïdora per tal de tenir dret a l'accés a les seves instal·lacions (cablejat, comptadors...). També s'hi inclouen les primes a les renovables i la moratòria nuclear, entre altres. És un concepte regulat.

3.5. El cost de desviament

Tot seguit es mostra una taula resum on s'indica la proporció del cost total de cada terme i a quin agent se li paga, a partir del desglossament d'un preu típic. És interessant observar que només un 50% del que es paga per l'energia és del preu directe de la cassació, i que una altra bona part es paga a la distribuïdora.

Taula 3.1. Taula resum del desglossament del preu final de l'energia. S'hi aprecia també la proporció de cada terme i a quin agent se li paga.

PENÍNSULA	PREU ENERGIA				
	AGENTS	CONCEPTE	PROPORCIÓ		TIPUS COST
	OMIE	PMD	49,28%	49,28%	Lliure, comú
	REE	SSCC	4,26%	14,29%	Lliure, comú
		Interrumpibilitat	1,90%		Lliure, comú
		Retribució	0,13%		Regulat
		Capacitat	4,39%		Regulat
		Desviament	0,57%		Lliure, propi
	AJUNTAMENTS	Taxa Municipal	0,96%	0,96%	Regulat
	MINISTERI	FEE	0,19%	0,19%	Regulat
	DISTRIBUIDORA	Peatge	35,29%	35,29%	Regulat

Per altra banda, s'observa que el cost de desviament només implica, aproximadament i en aquest exemple, un 0,6% del cost total del preu final de l'energia. De totes maneres, aquest cost és l'únic que depèn exclusivament de la pròpia comercialitzadora i que, per tant, aquesta té marge de maniobra per reduir-lo. Tenint en compte que el marge de benefici de la comercialització és baix, tot i que el volum facturat és elevat, cal reduir al màxim el cost de compra.

És per això que les comercialitzadores elèctriques dediquen esforços a millorar els algoritmes de compra, a fer millors previsions de consum dels seus clients, a estar atentes del sentit de desviament, etc., per tal de desviar-se el mínim possible i poder fer millors ofertes. La previsió del sentit de desviament del sistema pot ser útil, doncs, per reduir aquest cost.

4. MERCATS DE SERVEIS D'AJUSTAMENT DE GENERACIÓ I DEMANDA

Els mercats de serveis d'ajustament gestionats per l'Operador del Sistema (OS) tenen la finalitat d'adaptar els programes de les unitats de producció, resultants de la participació en el mercat diari, per garantir el compliment de les condicions de seguretat i qualitat requerides per al subministrament. Tot i així, el conjunt de mercats de serveis d'ajustament del sistema té una incidència reduïda en el preu final de l'energia [5].

A continuació es mostra un esquema cronològic de tot el procés de programació de generació i demanda, des del moment de la cassació a OMIE fins el moment del consum final.

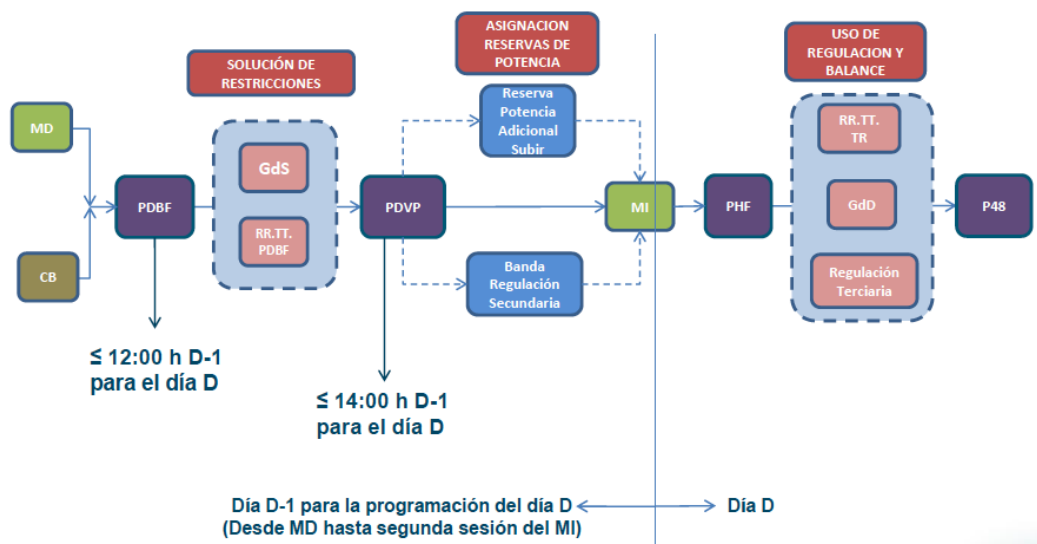


Figura 4.1. Esquema del procés de programació de generació i demanda. – Font: [2]

Inicialment s'assigna el Programa Diari Base de Funcionament (PDBF), un cop s'han fet la cassació a OMIE (MD) i els contractes bilaterals (CB). Tal com s'ha comentat en altres apartats, aquest procés es tanca a les 12h.

Després de realitzar la solució de les restriccions tècniques s'obté el Programa Diari Viable Provisional (PDVP), que se sol publicar abans de les 14h.

Tot seguit, abans d'entrar en el mercat intradiari (MI), es realitza l'assignació de reserves de potència i la banda de regulació secundària. És just després de cada mercat intradiari en què es generen els Programes Horaris Finals (PHF). També és a partir d'aquest punt en

què la comercialització deixa de tenir marge d'actuació.

Només un cop s'han realitzat tots els mercats de serveis d'ajustament s'obté el Programa de Tancament (P48), que són les dades reals que hi haurà hagut de generació i demanda [5].

A continuació, es detalla cadascun d'aquests serveis d'ajustament.

4.1. Solució de restriccions tècniques i publicació del Programa Diari Viable Provisional (PDVP)

Sobre la base del Programa Diari Base de Funcionament (PDBF), que integra els contractes bilaterals i els resultats de la cassació, l'Operador del Sistema (OS) inicia el procés d'anàlisi i solucions de restriccions tècniques. Per realitzar-les, a més de disposar de les previsions de demanda i producció eòlica i solar i de la informació de les indisponibilitats, se sol·licita la desagregació en unitats físiques dels programes d'energia de cada unitat de programació.

Les principals característiques d'aquest procés són [5]:

- Els proveïdors són les unitats de programació associades a instal·lacions de producció i de consum de bombeig.
- Es basa en un sistema d'ofertes específiques d'energia a pujar i baixar per la solució de restriccions tècniques, escollint els millors criteris per tal de garantir un mínim cost.
- El procés es divideix en dues fases. La primera té com a objectiu la solució de les restriccions tècniques identificades i, la segona, restablir l'equilibri generació-demanda sense generar noves restriccions tècniques.

Com a resultat d'aquest procés es publica el Programa Diari Viable Provisional (PDVP) i les limitacions de programa que han de ser respectades en els següents mercats.

4.2. Mercat de potència addicional a pujar

Aquest servei d'ajustament del sistema és la contractació i gestió de la reserva de potència a pujar requerida, de forma addicional a la disponible en el PDVP, per garantir la seguretat del sistema elèctric.

Aquest servei va ser creat amb l'objectiu de que els productors tèrmics que necessiten varies hores d'antelació per començar a generar electricitat pels prolongats processos d'arrancat puguin ser programats perquè estiguin disponibles al seu nivell de producció més baix viable tècnicament i puguin ser requerits en els mercats intradiaris o en els mecanismes de balanç, cobrint desviacions en la programació de la demanda.

Les unitats de programació a les que s'hagi assignat la provisió de reserva de potència addicional a pujar hauran de participar en el mercat intradiari per establir un programa de venda d'energia almenys igual al valor del seu mínim tècnic. A més, estaran obligades a fer ofertes en el mercat de gestió de desviaments de generació-consum, en cas que no s'hagi arribat al valor total de reserva de potència compromesa anteriorment.

4.3. Mercats de regulació i balanç

4.3.1. Regulació primària

Es defineix com el marge de potència en què els grups generadors poden modificar la seva potència generada de forma automàtica i en els dos sentits, mitjançant l'actuació del seu regulador de velocitat, en cas de produir-se un desviament de freqüència. El seu objectiu és la correcció automàtica i gairebé instantània (resposta completa en 30 segons com a màxim) dels desequilibris de freqüència. Aquest servei és obligatori i no té una remuneració addicional [6].

4.3.2. Regulació secundària i publicació del Programa Horari Final (PHF)

Es defineix com el marge de variació de potència en què el regulador secundari del sistema pot actuar automàticament i en els dos sentits, partint del punt de funcionament en què es trobi en cada instant. Ve donada per la suma, en valor absolut, de les contribucions individuals de tots els grups generadors sotmesos a aquest tipus de regulació. Permet a l'OS disposar d'una reserva de capacitat disponible molt flexible (inici de la resposta en no més de 30 segons i amb capacitat de mantenir-se durant un temps de 15 minuts fins poder ser substituïda per la regulació terciària) per resoldre de forma automàtica desequilibris

significatius entre generació i demanda.

Cada dia, l'OS estima la “reserva de banda de regulació secundària”, en termes de potència, necessària per assegurar el subministrament en condicions de fiabilitat en casos de desequilibri en temps real, i convoca el mercat corresponent després de la celebració del mercat diari i del de restriccions. Les empreses generadores, amb caràcter voluntari, presenten les seves ofertes de capacitat disponible, assignant-se la banda requerida per l'OS amb criteris de mínim cost.

El cost marginal de la banda de potència per cada hora marca el preu amb què es remunera tota la capacitat assignada en aquest mercat. A més, no només es remunera la banda de potència, sinó també la d'energia finalment utilitzada, valorada al preu de substitució de l'energia terciària. Per tant, aquest servei funciona mitjançant mecanismes de mercat, a diferència de la regulació primària [7].

La següent figura mostra esquemàticament el procés d'assignació de banda de regulació secundària:

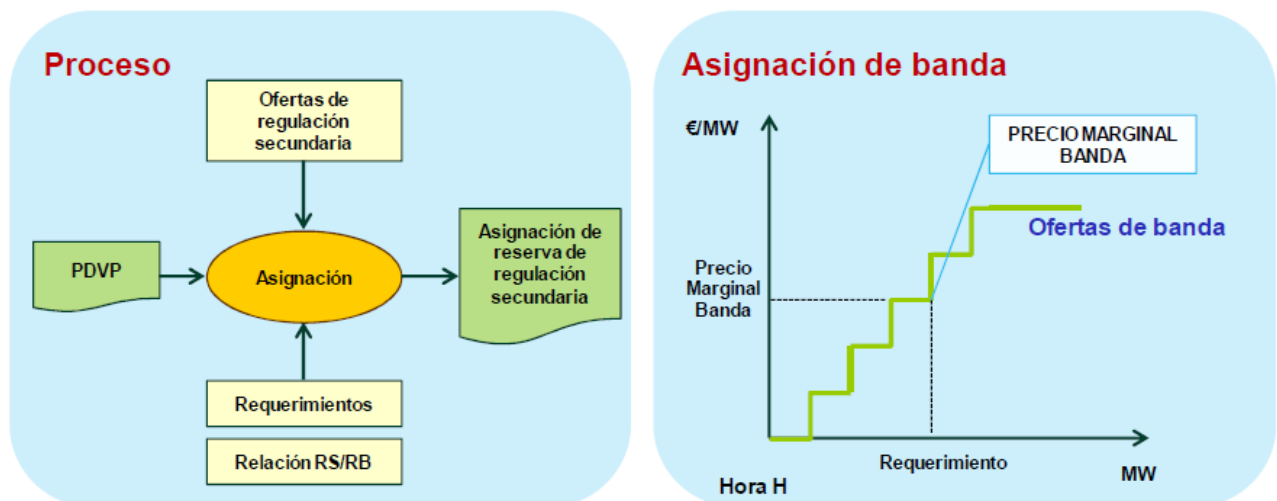


Figura 4.2. Esquema del procés d'assignació de banda de regulació secundària. – Font: [5]

Un cop s'han fet les assignacions de potència a pujar i la banda de regulació secundària, es publiquen els Programes Horaris Finals (PHF) després de cada mercat intradiari, de tal manera que durant el mateix dia D es van publicant diferents PHF.

4.3.3. Regulació terciària i publicació del Programa de Tancament (P48)

Està constituïda per la variació màxima de potència a pujar o a baixar de tots els grups generadors del sistema que pot ser mobilitzada en un temps no superior a 15 minuts, i que pot ser mantinguda, almenys, durant dues hores consecutives, amb l'objectiu de reconstruir la reserva de regulació secundària. És el mecanisme que té com a objectiu que, en cas de que es faci ús de la banda secundària per causa d'una contingència, es pugui restituir la reserva de banda.

Aquest servei és de caràcter obligatori per les unitats de producció que puguin oferir-lo. Així, totes les unitats de generació del sistema que puguin variar la seva producció en un temps no superior a 15 minuts i mantenir la variació durant 2 hores han d'oferir tota la seva capacitat excedentària (no contractada en altres mercats) a l'OS.

El preu de l'energia terciària utilitzada a pujar o a baixar és el preu marginal resultant de les ofertes realitzades pels generadors en front a una demanda a pujar o baixar respectivament. Per tant, també funciona mitjançant mecanismes de mercat, tot i així, al contrari que en la regulació secundària, els generadors només reben ingressos per aquest servei en cas que finalment s'hagi utilitzat.

La reserva terciària s'activa de forma manual, pujant o baixant la potència de les centrals de generació o consum de bombeig que hagin ofert al menor preu, en cas de pujar energia, o al major preu de recompra d'energia, en cas de baixar-la [7].

La següent figura mostra esquemàticament el procés d'assignació de banda de regulació terciària:

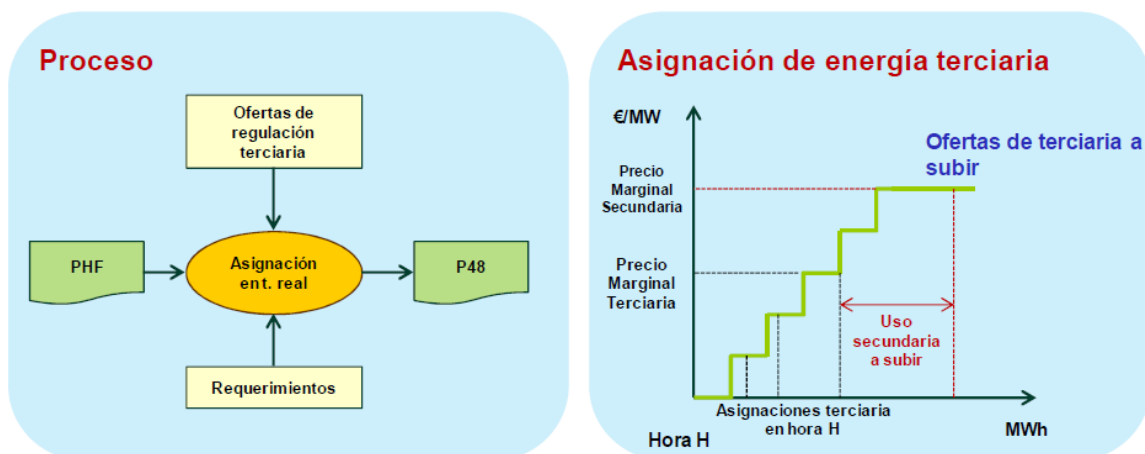


Figura 4.3. Esquema del procés d'assignació de banda de regulació terciària. – Font: [5]

Cal destacar que les ofertes de regulació terciària són assignades a temps real, a diferència dels altres mercats d'ajustament.

Un cop s'han dut a terme tots els mercats de serveis d'ajustament s'assigna el Programa de Tancament (P48), que són les dades de generació i consum definitives.

4.4. Mercat de gestió de desviaments

La gestió de desviaments és el mecanisme que utilitza l'OS per resoldre desequilibris entre l'oferta i la demanda que poden identificar-se unes poques hores abans del tancament, després de cada sessió intradiària. Així doncs, la principal diferència d'aquest mercat respecte als altres és que fa referència a desviaments previstos.

Durant l'operació normal, els agents de producció d'energia elèctrica comuniquen a l'OS les previsions de desviaments generació-consum originats per diferents causes. Només en cas que el conjunt dels desviaments previstos durant el període entre dos mercats intradiaris superin els 300 MW en mitja horària, es convoca el mercat de gestió de desviaments.

Aquest mercat consisteix en demanar ofertes als generadors en el sentit oposat al desviament previst en el sistema. És a dir, si es considera que el sistema es queda curt amb el programa de generació existent, es demanen ofertes de major producció als agents productors per generar més energia (incloent el bombeig per reduir consum) i, en cas oposat, quan en el sistema existeixi un programa llarg de producció respecte a la demanda i, per tant, es considera que sobra energia, es demanen ofertes als generadors per reduir el seu programa de producció (incloent el bombeig per augmentar consum).

La valoració de les modificacions de programa per la resolució d'aquests desviaments generació-consum es realitza al preu marginal de les ofertes assignades en cada període horari, per tant, també està regulat segons mecanismes de mercat [7].

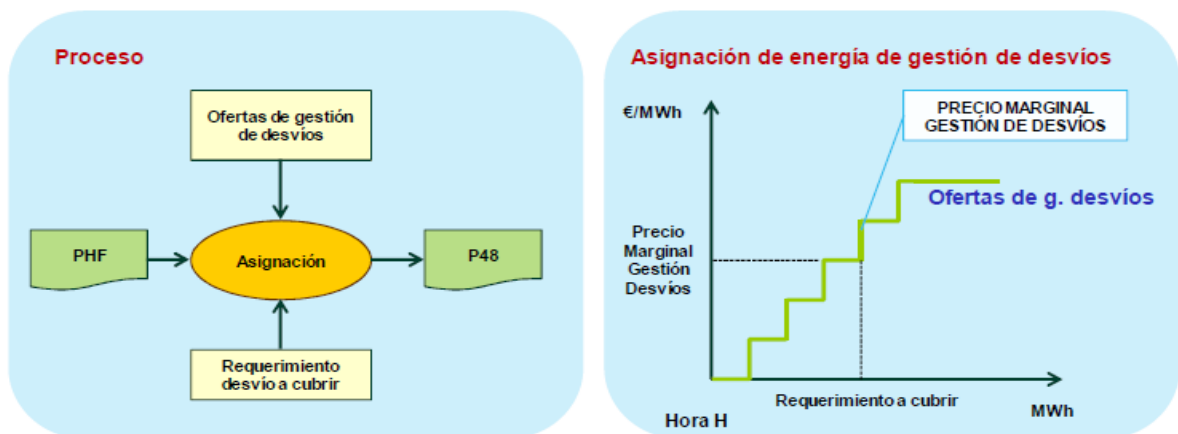


Figura 4.4. Esquema del procés del mercat de gestió de desviaments. – Font: [5]

Tot seguit, es mostra l'evolució temporal de la reacció física de les centrals generadores per tal de realitzar els ajustaments necessaris per garantir la seguretat i la qualitat del subministrament en front a desviaments generació-consum.

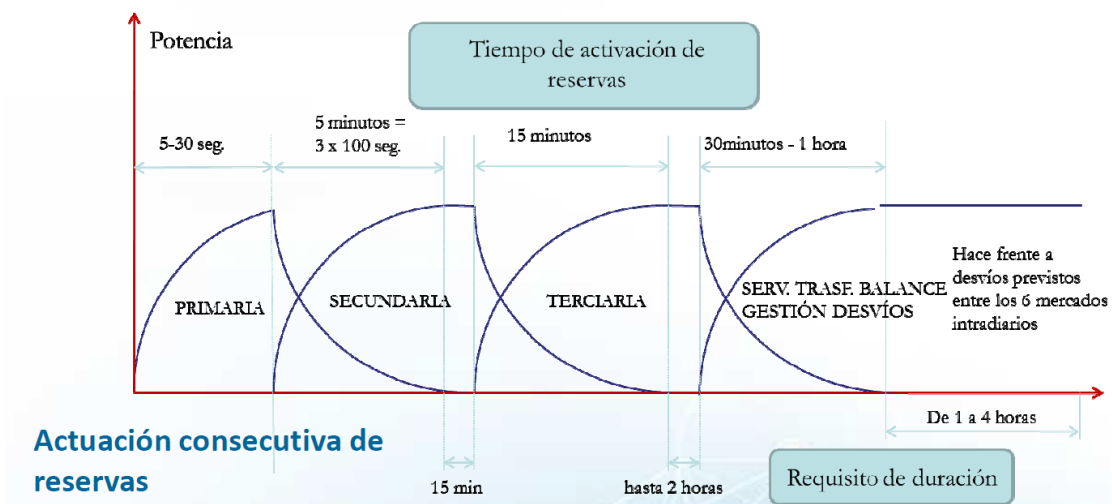


Figura 4.5. Gràfic de l'evolució temporal dels mercats de regulació i balanç per tal de garantir la seguretat i la qualitat del subministrament elèctric en front a desviaments generació-consum. – Font: [7]

4.5. Energia ajustada i sentit de desviament contrari al sistema

Un cop realitzats els ajustaments d'energia entre el moment de cassació i el moment del consum, REE enregistra les dades d'energia ajustada total, el sentit d'aquest ajustament i el seu cost associat.

“L'energia neta de gestió de desviaments, regulació terciària i regulació secundària”, és la quantificació de l'energia que s'ha hagut d'ajustar en total dins dels mercats de serveis d'ajustament.

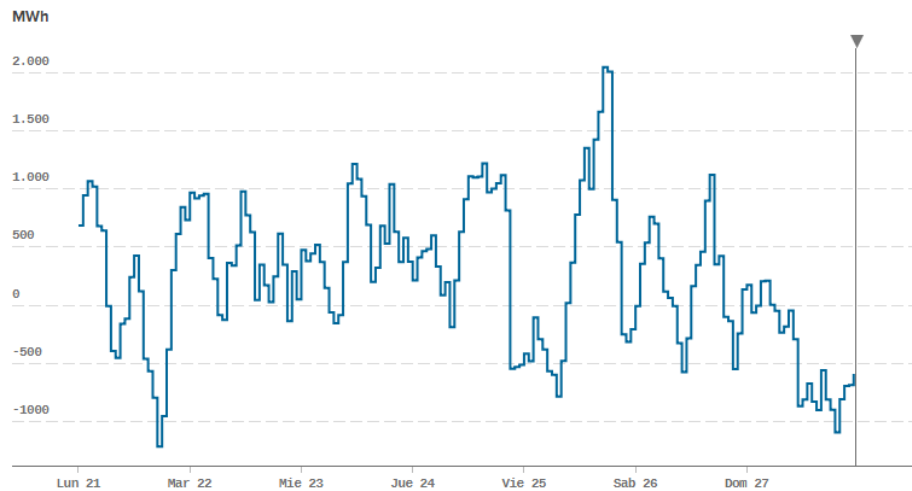


Figura 4.6. Dades horàries de l'energia neta de gestió de desviaments, regulació terciària i regulació secundària enregistrades entre els dies 21 i 27 de maig del 2018. – Font: [8]

Si l'energia ajustada és positiva, vol dir que la generació del sistema s'ha quedat curta respecte el consum i que, per tant, els productors han hagut d'aportar més energia de la prevista. Si, en canvi, l'energia ajustada és negativa, implica que la generació del sistema prevista ha estat superior del que realment s'ha consumit i que, per tant, s'ha hagut de reduir la producció.

Aquest sistema binari, que es forma de manera natural en funció del sentit en què s'ha hagut de realitzar l'ajustament, també és enregistrat per REE i s'anomena "sentit dels desviaments contraris al sistema", que pren valor -1 si la generació s'ha quedat curta respecte el consum i 1, si ha quedat per sobre.

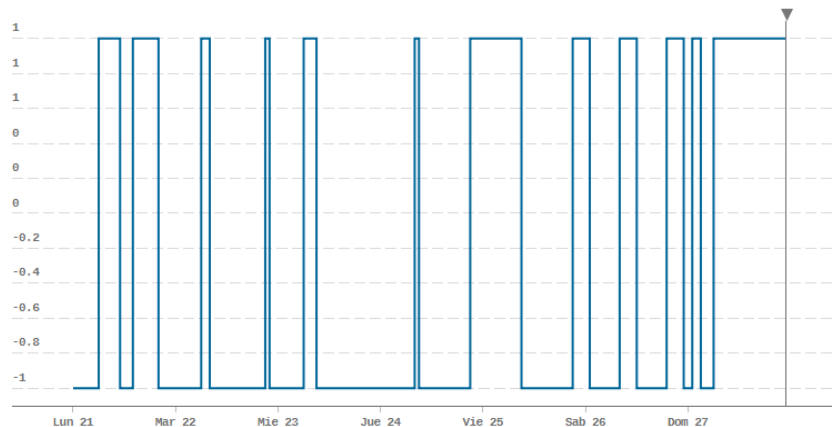


Figura 4.7. Dades horàries del sentit del desviament contrari al sistema enregistrades entre els dies 21 i 27 de maig del 2018. – Font: [8]

Si superposem les Figures 4.6 i 4.7 (veure Figura 4.8), s'observa que, efectivament, si l'energia ajustada és positiva implica que el sentit de desviament és -1, i viceversa.

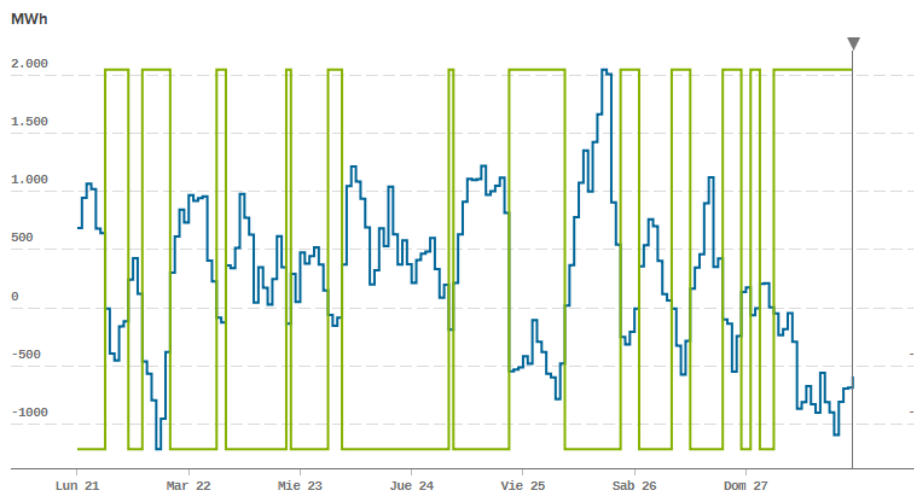


Figura 4.8. Dades horàries de l'energia neta de gestió de desviaments, regulació secundària i regulació primària (en blau) i el sentit del desviament contrari al sistema (en verd) enregistrades entre els dies 21 i 27 de maig del 2018. – Font: [8]

Per altra banda, i tal i com s'ha comentat anteriorment, aquests serveis d'ajustament es paguen a les unitats productores en forma de cost del desviament, que és l'únic factor del cost total de l'energia en què la comercialitzadora hi pot interferir.

El cost del desviament es trasllada a la comercialització i a la producció perquè són aquests els responsables de preveure la demanda i la producció. Aquest cost és únic per període horari i ve donat en €/MWh, de tal manera que com menys MWh es desvii la previsió, menys es pagarà en termes de desviament, i viceversa.

De totes maneres, el desviament del sistema ve donat pel consum total, tot i així, no es pot responsabilitzar a totes les comercialitzadores en la mateixa mesura, ja que cadascuna fa les previsions de millor o pitjor forma. Si, per exemple, l'energia ajustada en una hora concreta és de 1 500 MWh, vol dir que la generació s'ha quedat curta, el sentit és -1, i el cost de desviament podria ser, per exemple, de 10 €/MWh per cada MWh desviat de la comercialitzadora. Tot i així, aquest cost només el paguen les comercialitzadores que han contribuït, degut a la seva mala previsió, a que la generació s'hagi quedat curta, pagaran en concepte de "desviament per menor producció". En canvi, les comercialitzadores que s'hagin desviat de forma contrària, és a dir, que hagin demandat més que la resta, hauran contribuït a què sigui necessària menys quantitat d'energia ajustada i, per tant, s'hauran desviat "en favor" del sistema, pagaran en concepte de "desviament per major producció".

Cal dir, però, que quan el cost de desviament per menor producció és superior a zero, és a dir, que el sistema s'hagi quedat curt de generació, el cost de desviament per major producció és zero, i viceversa. D'aquesta manera es pot afirmar que les comercialitzadores que en una hora en concret es desvien "en favor" del sistema, no paguen el concepte de cost de desviament en aquest període. És important tenir present que hi ha casos en què el cost és zero en tots dos sentits, això és degut, generalment, a la petita quantitat d'energia ajustada en el període en qüestió (veure Figura 4.9).

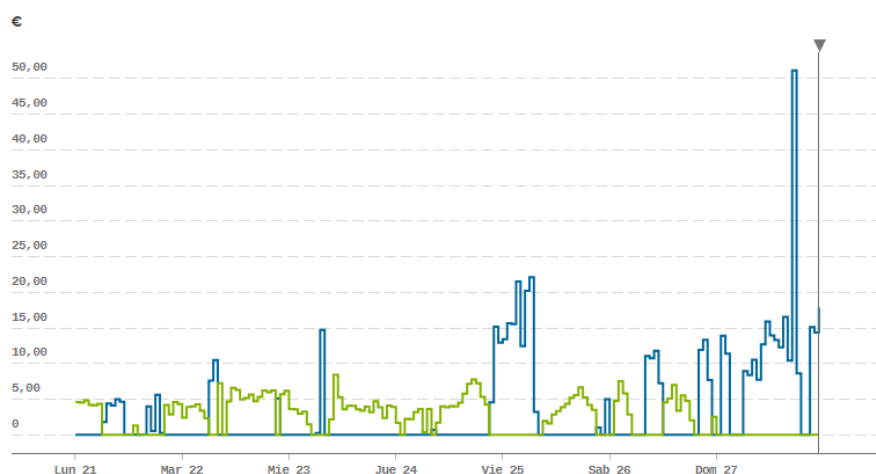


Figura 4.9. Dades horàries del cost de desviament per major producció, representats en color blau, comparat amb el cost de desviament per menor producció, en verd. – Font: [8]

Taula 4.1. Taula resum de les variables d'ajustament. És interessant, des del punt de vista d'una comercialitzadora, comprar procurant tenir un cost de desviament nul. – Font: Elaboració pròpia

Variables d'ajustament			
Energia ajustada	Sentit desviament	Cost desviament per major producció	Cost desviament per menor producció
> 0	-1	> 0	0
< 0	1	0	> 0

Així doncs, una de les formes amb què una comercialitzadora pot estalviar costos en concepte de desviament, és preveient el sentit de desviament del sistema en les hores futures per tal d'incrementar o reduir la seva compra i desviar-se “en favor” del sistema.

D'aquesta manera es defineix i es justifica la realització d'un model predictiu per tal de preveure el sentit de desviament, que és l'objectiu principal d'aquest projecte.

5. ESTUDI DE VARIABLES INFLUENTS I POSSIBLES PATRONS

Per tal de fer un model predictiu, abans que res, s'ha d'estudiar el comportament de la variable que es vol preveure. És possible que sigui una variable totalment aleatòria, que depengui d'altres variables, d'ella mateixa, etc. El fet de conèixer amb anterioritat els possibles patrons fan més eficient la realització del model.

5.1. MINITAB i estudi ANOVA

Per tal d'estudiar el comportament de les dades disponibles hi ha múltiples programaris i mètodes que es poden usar. En aquest cas en concret, s'ha fet servir el Minitab, programari que s'ensenya a utilitzar a les assignatures d'Estadística i Tècniques per a l'Estadística i la Qualitat del Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials a l'ETSEIB [9]. El Minitab és un programa d'estadística útil per fer múltiples estudis, ja sigui visualitzant dades o realitzant mètodes més avançats, com l'ANOVA.

L'objectiu principal de l'ús del Minitab és obtenir les primeres conclusions del comportament del sentit de desviament en funció de les moltes altres variables del sistema elèctric, que també queden enregistrades per REE, generalment també de forma horària.

Per tal de realitzar aquest primer estudi, s'ha fet servir l'ANOVA, que és un mètode que es basa en l'anàlisi d'hipòtesis, el qual parteix de que una suposició és vertadera i, a continuació, prova aquesta suposició mitjançant mostres de dades. Els tests d'hipòtesis inclouen dues hipòtesis: la hipòtesi nul·la, que és la suposició inicial de què totes les mitjanes poblacionals són iguals, i la hipòtesi alternativa, que és la que considera que no són iguals i que, per tant, hi ha influència significativa.

Més concretament, l'anàlisi ANOVA realitzat és d'un sol factor, en aquest cas, el sentit de desviament. Les variables que es posaran a prova són les que se sospita que poden afectar o no amb què el sistema es desvii en un sentit o un altre [10].

5.2. Variables categòriques i numèriques

Abans de posar-se a analitzar les dades, cal saber classificar-les en funció de si són categòriques o numèriques.

Les variables categòriques són aquelles que no es poden mesurar, per exemple, si un examen està aprovat o suspès, o bé si un pastís és dolç, salat o amarg. El cas de la variable de resposta que es vol estudiar en aquest projecte, el sentit de desviament, és un cas de variable categòrica: el sistema es queda curt de generació o genera més del compte. Per estudiar aquestes variables en Minitab és convenient adjudicar-les-hi un valor numèric que, en el cas exposat, és -1 i 1, respectivament.

Les variables numèriques, en canvi, són totes aquelles que es poden quantificar, és a dir, poden ser representades per un nombre infinit de valors. En el cas d'aquest projecte, l'energia ajustada és una variable numèrica i, de fet, és l'anàloga del sentit de desviament. Segons l'estudi que es dugui a terme es pot necessitar la resposta en variable categòrica (sentit de desviament) o bé en variable numèrica (energia ajustada). Aquesta doble disponibilitat de dades pot facilitar de forma significativa el procés.

5.3. Variables d'estudi

Per tal de realitzar l'estudi en Minitab, s'han fet servir totes les dades horàries disponibles a REE des del dia 1 de gener de 2015 fins el dia 25 de març del 2018.

5.3.1. Variables de resposta

Les dues variables de resposta que es volen estudiar són el sentit de desviament, com a variable categòrica, i l'energia ajustada, com a variable numèrica mesurada en MWh. En funció de amb quina variable predictiva es vulgui comparar la resposta es farà servir un tipus o un altre.

5.3.2. Variables predictives

Tot seguit, es procedeix a decidir quines variables poden influir en el sentit del desviament, també anomenades variables predictives. S'han contemplat dades d'energia del Programa de Tancament (P48) que no estan disponibles a temps real per a fer previsions. De totes

maneres, aquestes no difereixen gaire de les dades disponibles com el Programa Horari Final (PHF) i, per tant, per fer l'estudi d'influència són vàlides igualment. Un estudi així amb dades PHF seria més complex, ja que per diferents franges horàries del dia hi ha més o menys dades de PHF, en funció dels mercats intradiaris.

5.3.2.1. Tipus de generació

Tal i com s'ha comentat en apartats anteriors, hi ha diferents tipus de generació i es poden classificar de diverses maneres. Pel que fa a aquest estudi, interessa la diferència de gestionabilitat del recurs energètic, per exemple, l'energia nuclear és potència base i, per tant, és tècnicament poc viable regular-ne la producció. En canvi, en el cicle combinat és tècnicament més viable, així com en el carbó. D'aquesta manera, segons la quantitat de producció de cada tipus de generació, podria ser que impliqués un sentit de desviament o un altre. De fet, per tal de realitzar els serveis d'ajustament se sol recórrer a centrals gestionables per fer una regulació més eficaç.

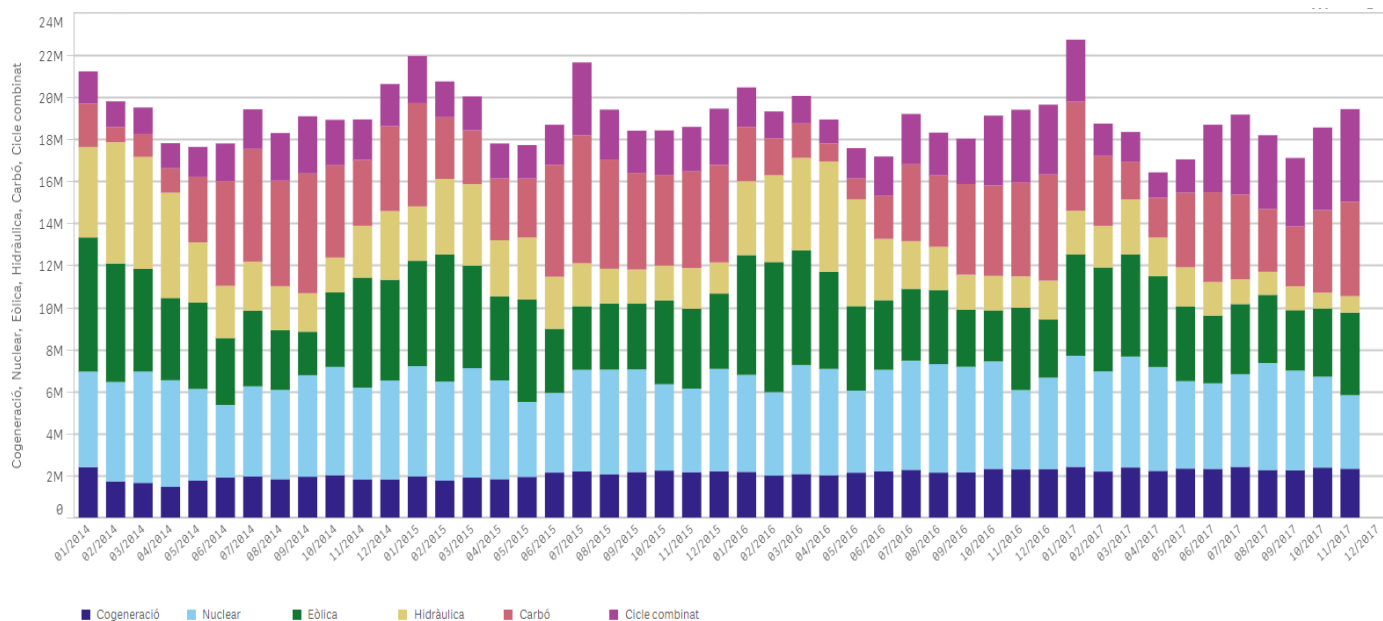


Figura 5.1. Generació total, distribuïda per tipologia i per mesos, des del gener del 2014 fins al novembre del 2017. Representació per colors: cogeneració - blau fosc, nuclear - blau cel, eòlica - verd, hidràulica - groc, carbó - vermell, cicle combinat - lila. – Font: Elaboració pròpia, mitjançant programari Qlik Sense.

A la Figura 5.1. es pot observar que tant l'energia nuclear com la cogeneració es poden considerar potència base, ja que la seva generació és constant. L'energia eòlica no és fàcilment gestionable ni tampoc és potència base, tot i que li correspongui una proporció important, això és degut a la variabilitat del seu recurs natural i, per tant, el seu cost

d'oportunitat nul. En canvi, s'observa que la hidràulica i el carbó són fàcilment gestionables. En èpoques de pluges (mesos de primavera) la generació hidràulica predomina per sobre del carbó i, per contra, en èpoques posteriors a la sequera (mesos de tardor), predomina la generació de carbó. Es pot notar que el comportament de la generació de cycle combinat és similar a la del carbó.

En cada període horari, la quantitat de generació de cada tipologia pot ser significativa alhora de preveure el desviament.

Tot seguit, a la Figura 5.2. es mostra la matriu de correlacions entre cada tipus de generació i el sentit de desviament, així com la que hi ha entre els tipus de generació en sí. Es pot observar que hi ha certa tendència a que, com més generació gestionable hi ha (carbó, cycle combinat i hidràulica), més tendeix el sentit a prendre el valor -1, és a dir, que s'ha hagut d'aportar energia. En canvi, com més generació poc gestionable hi ha (eòlica, nuclear i cogeneració), més tendeix a prendre el valor 1. També és interessant veure que com més energia eòlica es genera, menys n'hi ha de cycle combinat i carbó, i viceversa, a causa de la prioritat renovable. La cogeneració està molt lligada a la generació de cycle combinat perquè ambdues fan servir gas com a combustible.

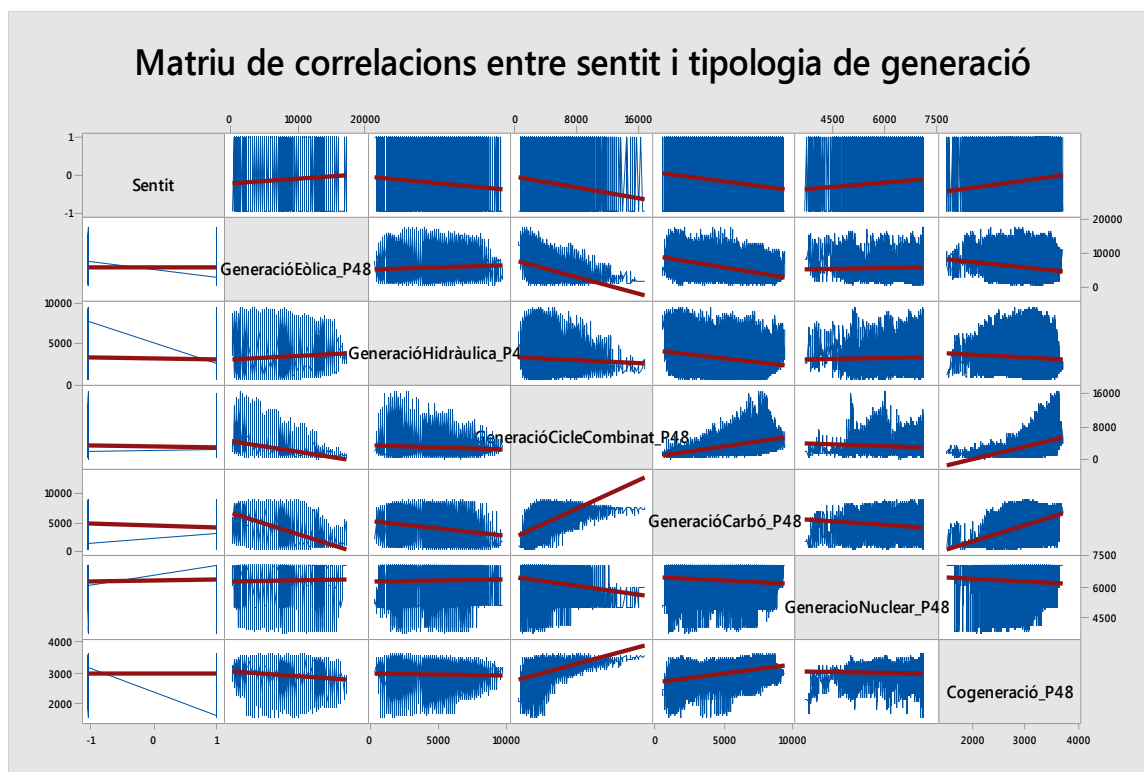


Figura 5.2. Matriu de correlacions entre sentit i tipologia de generació. Cal llegir la primera fila per veure la tendència del sentit en funció del tipus de generació. En vermell es representa la correlació lineal i, en blau, el núvol de dades amb línies de connexió. – Font: Elaboració pròpia, mitjançant Minitab.

5.3.2.1.1 Significança entre generació eòlica i sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la generació eòlica amb el factor del sentit de desviament. Hi ha dues gràfiques de l'estudi que són molt representatives de la significança, el gràfic d'interval i la comparació de Tukey. El gràfic d'interval ajuda a veure la tendència que hi ha de la variable predictiva per cada categoria del factor. En canvi, la comparació de Tukey mostra el grau de significança d'aquesta tendència [11].

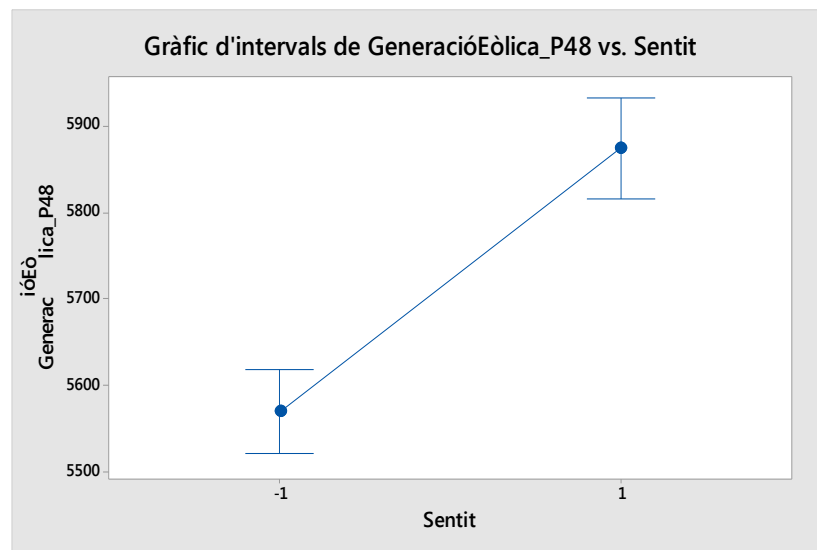


Figura 5.3. Gràfic d'interval de la generació eòlica vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic d'interval es pot veure la tendència d'una variable en funció d'un factor mitjançant la comparació dels intervals de mitjanes amb un 95% de confiança. En aquest cas concret s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la generació eòlica ha estat més elevada.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.4., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de generació quan el sentit és 1 i valors de generació quan el sentit és -1. Cal observar, doncs, que si aquest interval no conté el zero, implica que hi ha una influència amb certa significança. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero i, a més, els valors d'aquest són positius, la qual cosa ratifica la tendència vista en la Figura 5.3.

Per altra banda, també s'ha fet servir el valor estadístic P, que indica la influència d'una variable respecte una altra. Si és inferior a 0,05 s'evidencia que la hipòtesi alternativa és certa i que, per tant, hi ha influència significativa entre variables. En aquest cas, el p-valor

és 0,000.

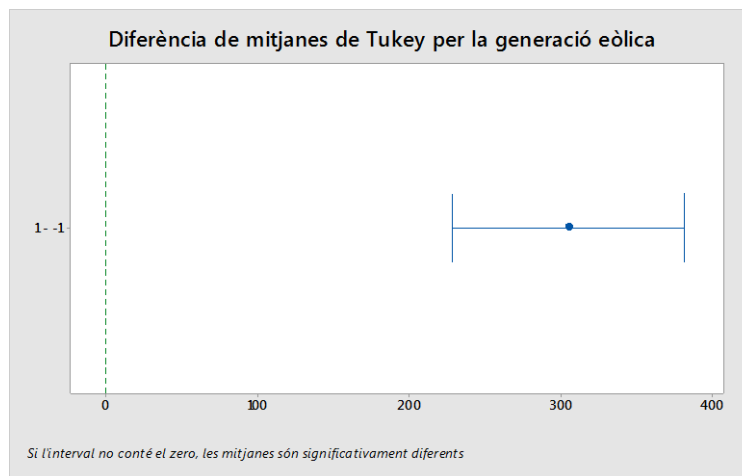


Figura 5.4. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la generació eòlica vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

Així doncs, davant els anàlisis realitzats, es pot afirmar que la quantitat d'energia eòlica generada influeix de forma significativa en el sentit de desviament del sistema. Més concretament, s'associa a que el sistema es quedi llarg de generació, ja que com més generació eòlica hi ha, més tendeix el sentit a tenir valor 1.

5.3.2.1.2 Significança entre generació hidràulica i sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la generació hidràulica amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la generació hidràulica ha estat més reduïda.

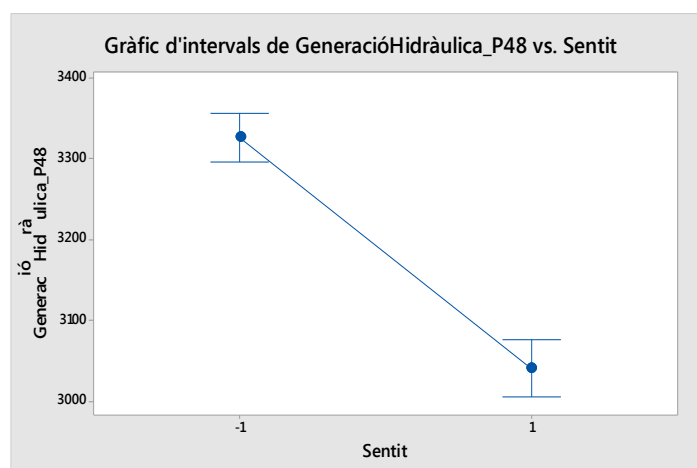


Figura 5.5. Gràfic d'interval de la generació hidràulica vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.6., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de generació quan el sentit és 1 i valors de generació quan el sentit és -1. Cal observar, doncs, que si aquest interval no conté el zero, implica que hi ha una influència amb certa significança. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero i, a més, els valors d'aquest són negatius, la qual cosa ratifica la tendència vista en la Figura 5.5.

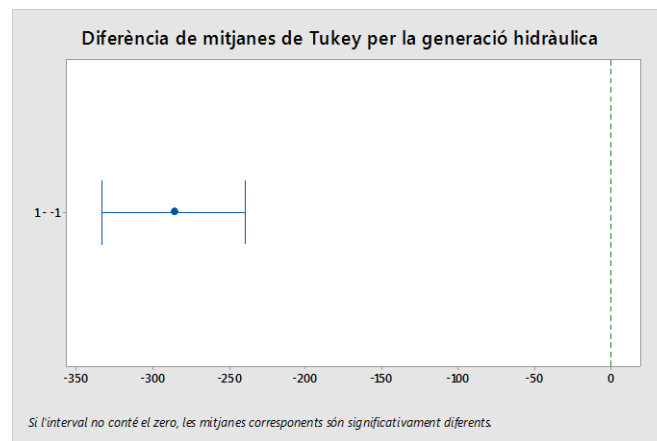


Figura 5.6. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la generació hidràulica vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En aquest cas, el valor P també és 0,000, per tant, hi ha influència significativa entre variables.

Així doncs, davant els anàlisis realitzats, es pot afirmar que la quantitat d'energia hidràulica generada influencia de forma significativa en el sentit de desviament del sistema. Més concretament, s'associa a què el sistema es quedi curt de generació, ja que com més generació hidràulica hi ha, més tendeix el sentit a tenir valor -1.

5.3.2.1.3 Significança entre generació de carbó i sentit.

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la generació de carbó amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la generació de carbó ha estat més reduïda.

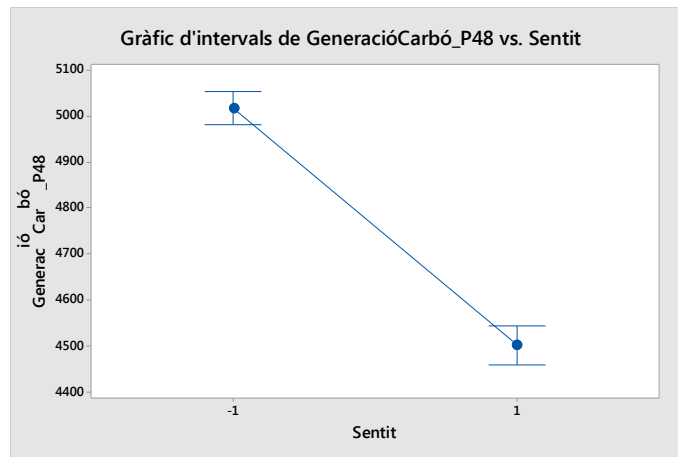


Figura 5.7 Gràfic d'interval de la generació de carbó vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.8., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de generació quan el sentit és 1 i valors de generació quan el sentit és -1. Cal observar, doncs, que si aquest interval no conté el zero, implica que hi ha una influència amb certa significança. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero i, a més, els valors d'aquest són negatius, la qual cosa ratifica la tendència vista en la Figura 5.7. A més, en aquest cas, l'interval es veu més desplaçat del zero que en els casos anteriors, això implica que la influència és major.

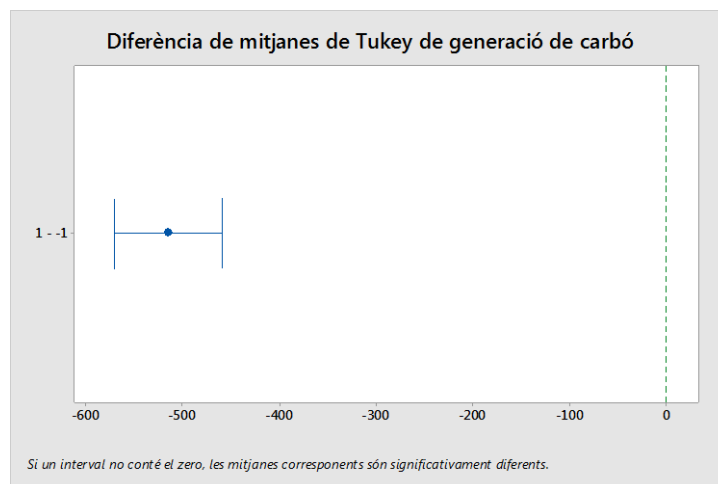


Figura 5.8. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la generació de carbó vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

El valor P també és 0,000, per tant, hi ha influència significativa entre variables.

Així doncs, davant els anàlisis realitzats, es pot afirmar que la quantitat d'energia generada amb carbó influeix de forma significativa en el sentit de desviament del sistema. Més concretament, s'associa a que el sistema es quedi curt de generació, ja que com més generació amb carbó hi ha, més tendeix el sentit a tenir valor -1. Cal dir, també, que de forma més pronunciada que la generació hidràulica.

5.3.2.1.4 Significança entre generació de cycle combinat i sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la generació de cycle combinat amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la generació de cycle combinat ha estat més reduïda.

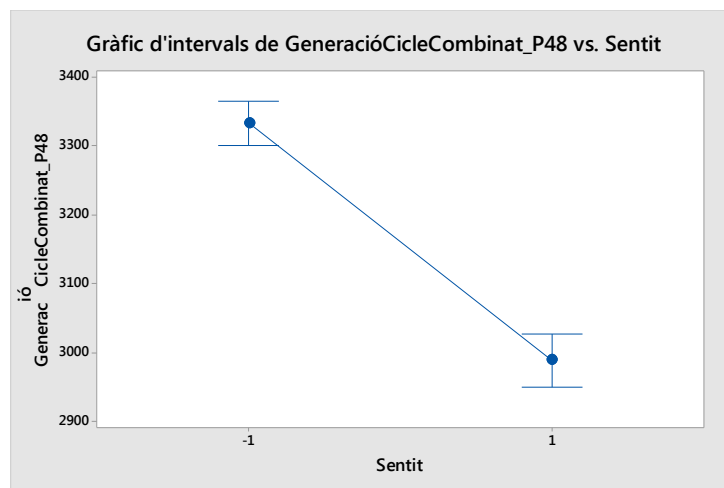


Figura 5.9. Gràfic d'interval de la generació de cycle combinat vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.10., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de generació quan el sentit és 1 i valors de generació quan el sentit és -1. Cal observar, doncs, que si aquest interval no conté el zero, implica que hi ha una influència amb certa significança. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero i, a més, els valors d'aquest són negatius, la qual cosa ratifica la tendència vista en la Figura 5.9.

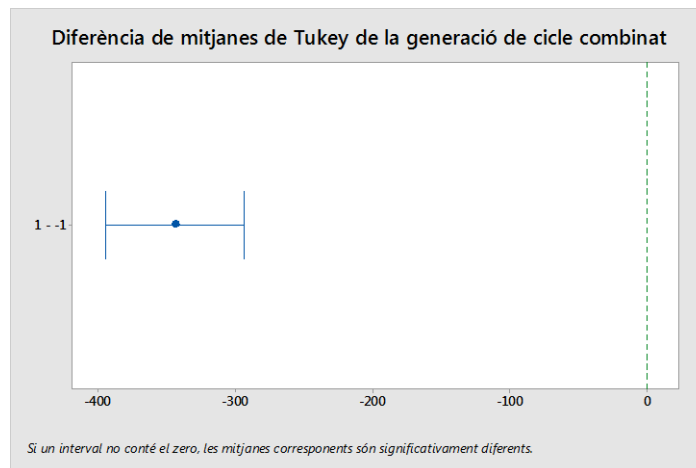


Figura 5.10 Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la generació de cicle combinat vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

El valor P també és 0,000, per tant, hi ha influència significativa entre variables.

Així doncs, davant els anàlisis realitzats, es pot afirmar que la quantitat d'energia generada de cicle combinat influeix de forma significativa en el sentit de desviament del sistema. Més concretament, s'associa a què el sistema es quedi curt de generació, ja que com més generació de cicle combinat hi ha, més tendeix el sentit a tenir valor -1.

5.3.2.1.5 Significança entre la generació nuclear i el sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la generació nuclear amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la generació nuclear ha estat més elevada.

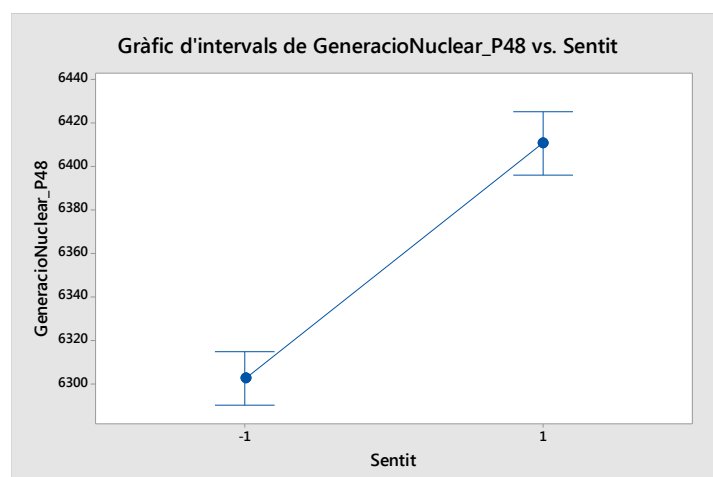


Figura 5.11 Gràfic d'interval de la generació nuclear vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.12., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de generació quan el sentit és 1 i valors de generació quan el sentit és -1. Cal observar, doncs, que si aquest interval no conté el zero, implica que hi ha una influència amb certa significança. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero i, a més, els valors d'aquest són positius, la qual cosa ratifica la tendència vista en la Figura 5.11.

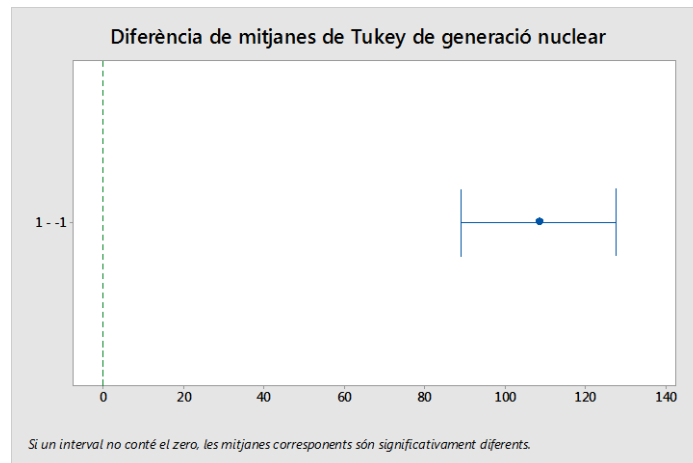


Figura 5.12 Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la generació nuclear vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

El valor P també és 0,000, per tant, hi ha influència significativa entre variables.

Així doncs, davant els anàlisis realitzats, es pot afirmar que la quantitat d'energia nuclear generada influeix de forma significativa en el sentit de desviament del sistema. Més concretament, s'associa a que el sistema generi més del compte, ja que com més generació nuclear hi ha, més tendeix el sentit a tenir valor 1. Cal dir, però, que ho fa de forma no tan significativa com la producció eòlica, ja que l'interval de Tukey està menys desplaçat del zero.

5.3.2.1.6 Significança entre cogeneració i sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la cogeneració amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la cogeneració ha estat més elevada.

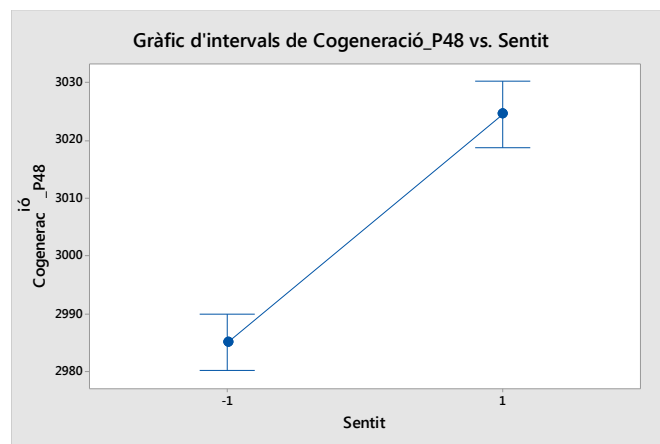


Figura 5.13. Gràfic d'interval de la cogeneració vers el sentit de desviament del sistema.
– Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.14., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de generació quan el sentit és 1 i valors de generació quan el sentit és -1. Cal observar, doncs, que si aquest interval no conté el zero, implica que hi ha una influència amb certa significança. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero i, a més, els valors d'aquest són positius, la qual cosa ratifica la tendència vista en la Figura 5.13.

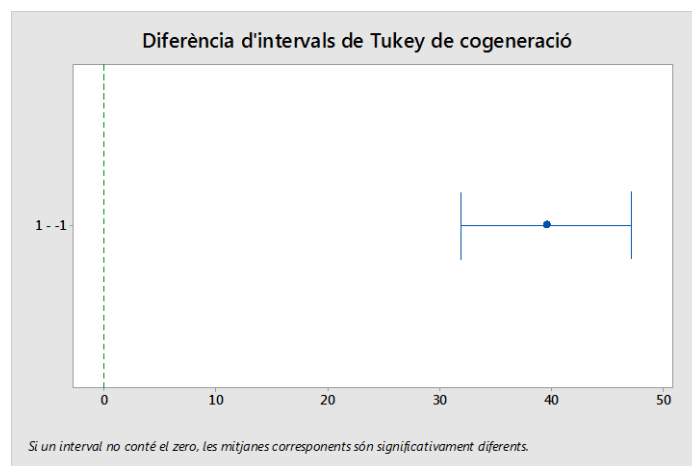


Figura 5.14 Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la cogeneració vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

El valor P també és 0,000, per tant, hi ha influència significativa entre variables.

Així doncs, davant els anàlisis realitzats, es pot afirmar que la quantitat de cogeneració influeix de forma significativa en el sentit de desviament del sistema. Més concretament,

s'associa a que el sistema generi més del compte, ja que com més cogeneració hi ha, més tendeix el sentit a tenir valor 1. Cal dir, però, que ho fa de forma no tan significativa com la producció eòlica o nuclear, ja que l'interval de Tukey està menys desplaçat del zero.

5.3.2.2. Preu del mercat diari, OMIE

El preu d'OMIE podria ser un condicionant del sentit de desviament, ja que està bastant relacionat amb el tipus de generació.

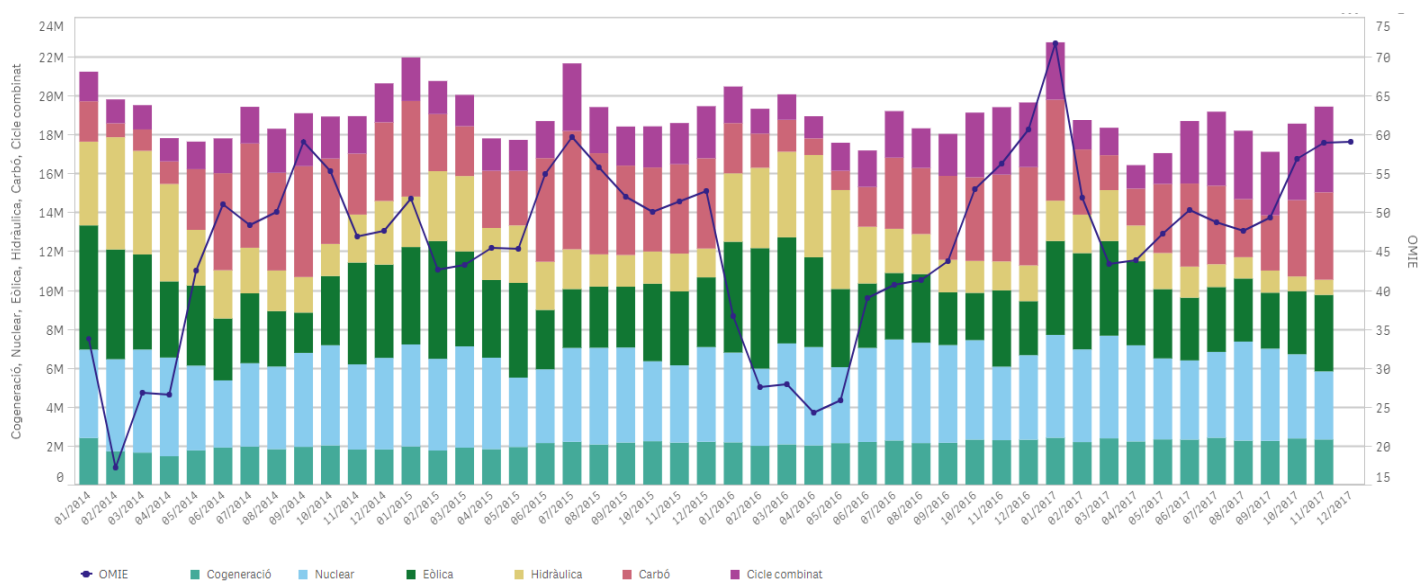


Figura 5.15. Preu d'OMIE, en format línia i de color blau fosc, front la generació total, distribuïda per tipologia i per mesos, des del gener del 2014 fins al novembre del 2017. Representació per colors: cogeneració - blau fosc, nuclear - blau cel, eòlica - verd, hidràulica - groc, carbó - vermell, cicle combinat - lila. – Font: Elaboració pròpia, mitjançant programari Qlik Sense.

A la Figura 5.15 es representa el preu d'OMIE distribuït per mesos i es superposa a la representació de la tipologia de generació de la Figura 5.1. Es pot observar que té certa estacionalitat, ja que a la primavera, és a dir, èpoques de pluges i, per tant, de més producció hidràulica, el preu sol ser més baix, en canvi, en èpoques de sequera característiques de finals d'estiu i tardor, és quan el preu experimenta un increment. Cal comentar que el pic del gener del 2017 és degut a una pujada singular del preu del gas justament durant aquell mes, també.

Té sentit, per tant, pensar que si el preu d'OMIE està relacionat amb la tipologia de generació, també pot estar-ho en el sentit de desviament del sistema.

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA del preu d'OMIE amb el factor del sentit de

desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) el preu d'OMIE ha estat més elevat. De totes maneres, aquesta diferència és poc significativa, ja que els intervals es solapen entre ells.

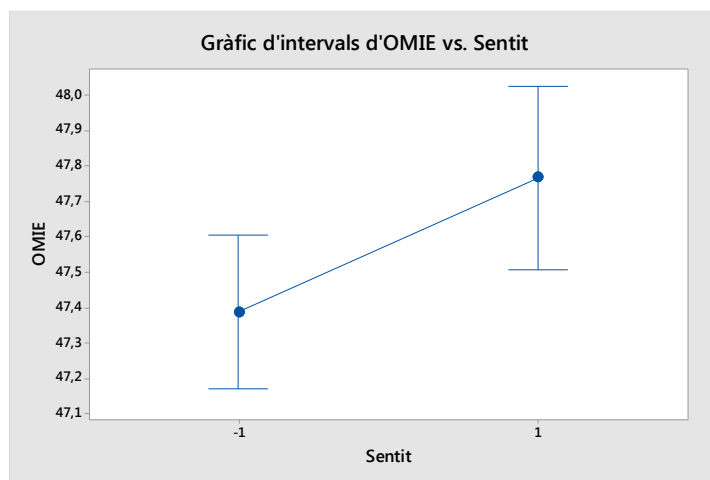


Figura 5.16. Gràfic d'interval del preu d'OMIE vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.17., s'il·lustra un interval de diferències entre valors d'OMIE quan el sentit és 1 i valors d'OMIE quan el sentit és -1. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero i, a més, els valors d'aquest són positius, la qual cosa ratifica la tendència vista en la figura 5.16.

De totes maneres, el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey també és capaç de mostrar el grau de significança d'aquesta influència i, en aquest cas, sembla que no és baix. L'interval no conté el zero però està molt pròxim a ell.

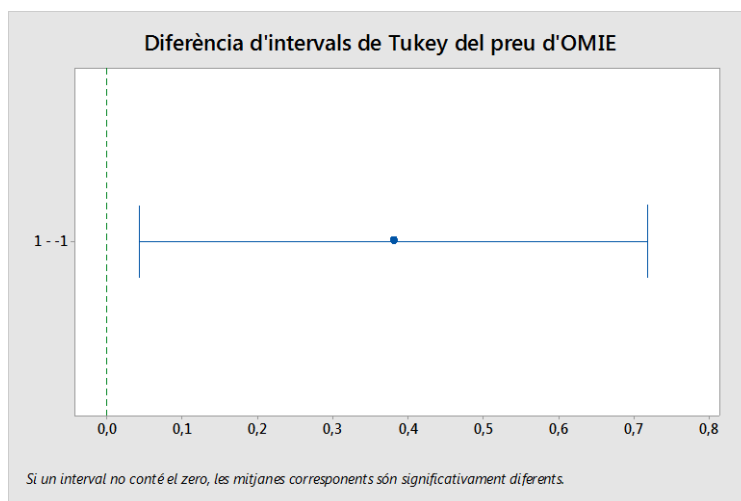


Figura 5.17. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey pel preu d'OMIE vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

El valor P no és 0,000 com en els altres casos, pel preu d'OMIE és 0,028.

Així doncs, davant els anàlisis realitzats, es pot afirmar que el preu d'OMIE influeix en el sentit de desviament del sistema. De totes maneres, aquesta influència no és tan significativa com en el cas de la tipologia de generació. Per tant, en cas que s'hagin de descartar variables, ja que no es vol saturar la regressió de variables, el preu d'OMIE podria ser una d'aquestes.

5.3.2.3. Demanda

Al tractar-se de l'equilibri generació-demanda, també es considera important estudiar els possibles efectes que pugui tenir la demanda en el sentit de desviament del sistema.

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la demanda amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la demanda ha estat més elevada. De totes maneres, aquesta diferència és poc significativa, ja que els intervals es solapen entre ells, tal i com passa també amb el preu d'OMIE.

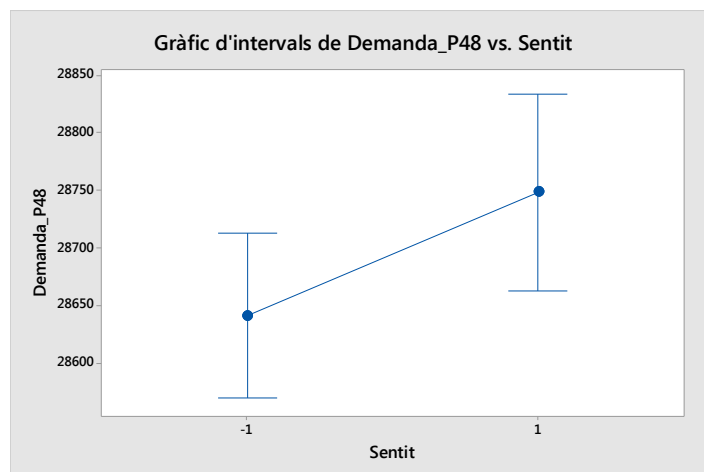


Figura 5.18. Gràfic d'interval de la demanda vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

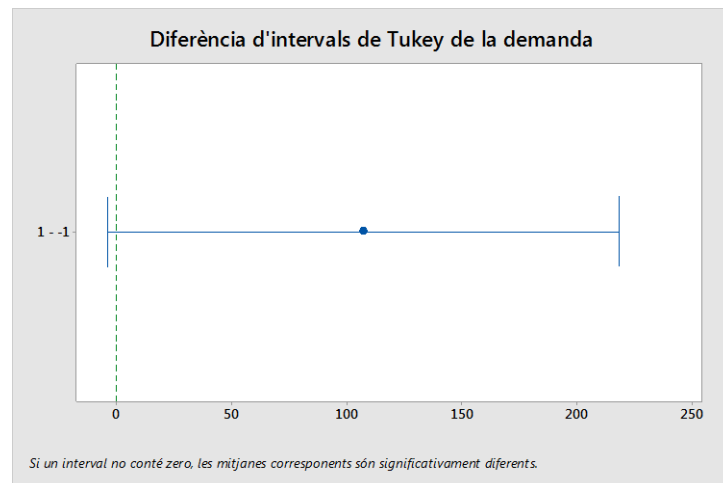


Figura 5.19. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la demanda vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval sí que conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.19., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de demanda quan el sentit és 1 i valors de demanda quan el sentit és -1. En aquest cas, es veu com l'interval sí que conté el zero, per la qual cosa es pot afirmar que la influència de la demanda sobre el sentit del desviament del sistema no és significativa, ratificant així les primeres conclusions extretes de la Figura 5.18.

A més, el valor P és 0,059, és a dir, superior a 0,05. Per tant, es confirma que la demanda no influeix de manera significativa el sentit de desviament del sistema.

5.3.2.4. Banda de regulació secundària

Les dades de la banda de regulació secundària estan disponibles el dia D-1, a diferència de les dades de regulació terciària, que es donen a temps real. Així doncs, i ja que la banda de regulació secundària és la capacitat reservada pels possibles desviaments del sistema, ja sigui a pujar o a baixar, es creu que pot tenir-hi una influència significativa.

5.3.2.4.1 Significança entre la banda a pujar i sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la banda de regulació secundària a pujar amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la banda a pujar ha estat més elevada.

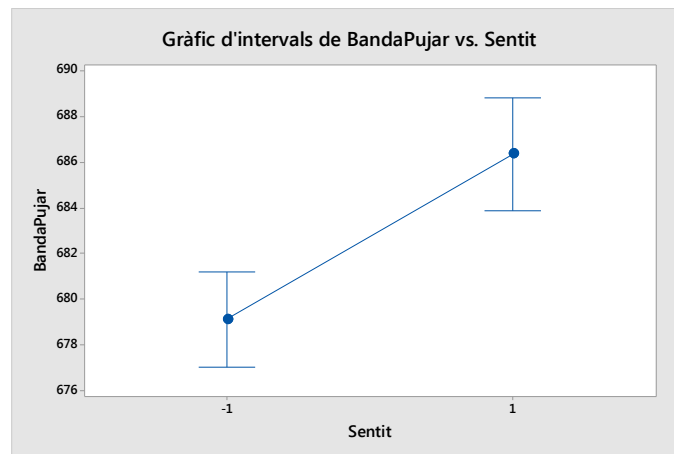


Figura 5.20 Gràfic d'interval de la banda de regulació secundària a pujar vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.21., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de banda a pujar quan el sentit és 1 i valors de banda a pujar quan el sentit és -1. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero, per la qual cosa es pot afirmar que la influència de la banda a pujar sobre el sentit del desviament del sistema és significativa, ratificant així les primeres conclusions extretes de la Figura 5.20.

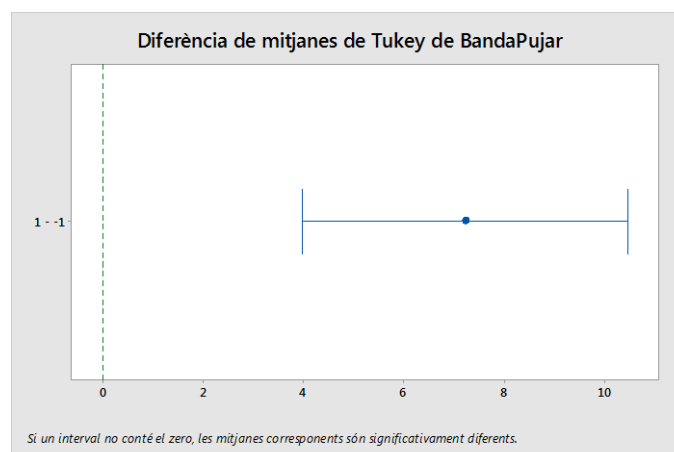


Figura 5.21. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la banda a pujar vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

A més, el valor P és de 0,000, confirmant així que la banda de regulació secundària a pujar influeix significativament en el sentit de desviament del sistema, ja que el valor P és inferior a 0,05.

5.3.2.4.2 Significança entre la banda a baixar i el sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la banda secundària a baixar amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) la banda a pujar ha estat més elevada.

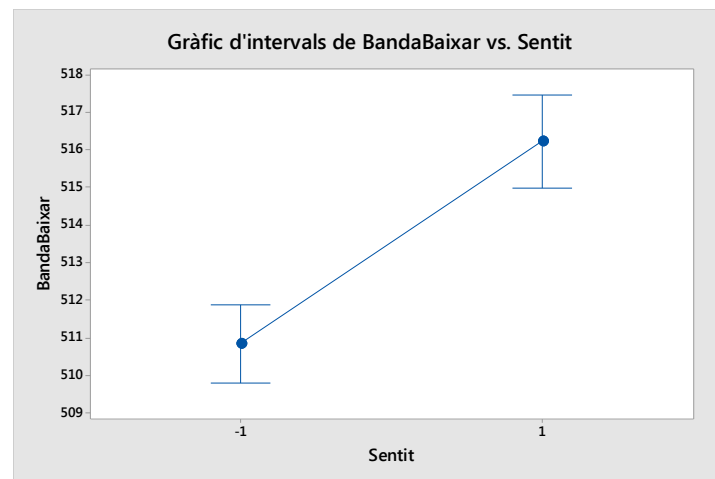


Figura 5.22. Gràfic d'interval de la banda de regulació secundària a baixar vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.23., s'il·lustra un interval de diferències entre valors de banda a pujar quan el sentit és 1 i valors de banda a baixar quan el sentit és -1. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero, per la qual cosa es pot afirmar que la influència de la banda a baixar sobre el sentit del desviament del sistema és significativa, ratificant així les primeres conclusions extretes de la Figura 5.22.

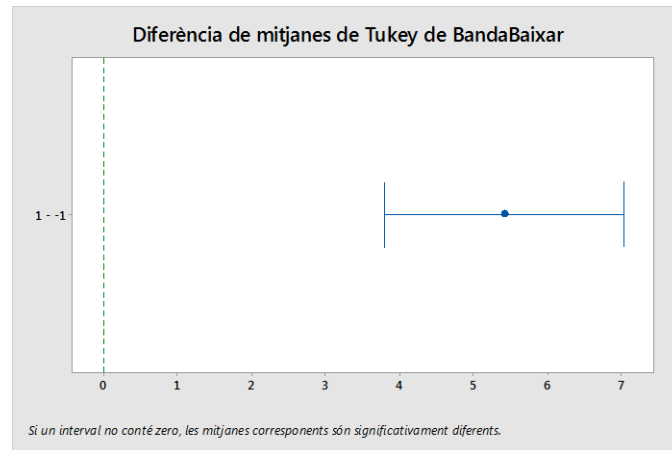


Figura 5.23. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la banda a baixar vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

A més, el valor P de la banda de regulació secundària a baixar és 0,000, inferior a 0,05 i, per tant, es confirma la significança de la seva influència en el sentit de desviament.

És curiós veure, però, que ambdues bandes tenen la mateixa tendència, tot i que una indica la capacitat a pujar i l'altra a baixar. Segons la intuïció, els patrons haurien de ser oposats, però sembla que no és així.

5.3.2.5. Interconnexions amb França

L'energia que es transmet cap a França o la que s'hi rep pot donar resposta a possibles ajustaments d'última hora, ja que si se n'exporta pot voler dir que s'ha generat més del compte, i viceversa, és per això que s'ha decidit estudiar la influència que hi pot tenir.

5.3.2.5.1 Significança entre l'exportació a França i el sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de l'exportació a França amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és 1 (el sistema genera més del compte) l'exportació a França ha estat més elevada.

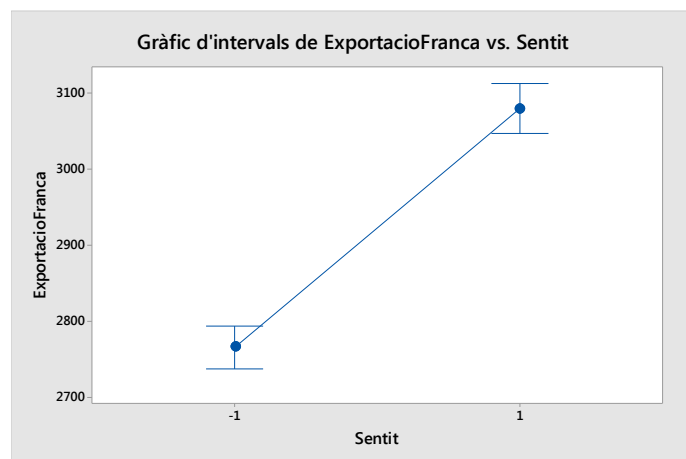


Figura 5.24 Gràfic d'interval de l'exportació a França vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.25., s'il·lustra un interval de diferències entre valors d'exportació quan el sentit és 1 i valors d'exportació quan el sentit és -1. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero, per la qual cosa es pot afirmar que la influència de l'exportació a França sobre el sentit del desviament del sistema és significativa, ratificant així les primeres conclusions extretes de la Figura 5.24.

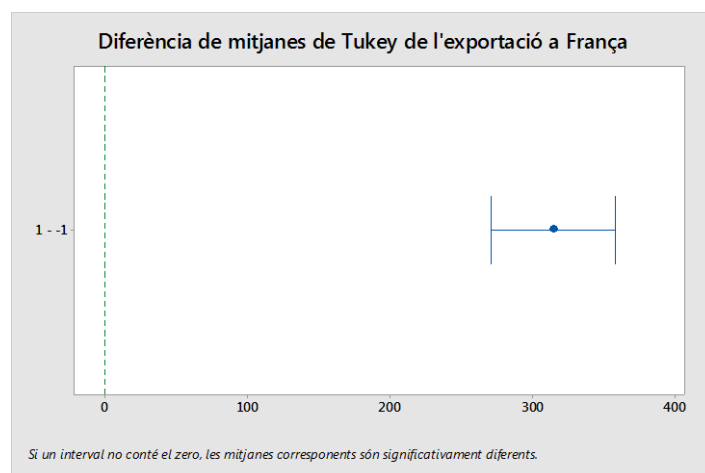


Figura 5.25. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per l'exportació a França vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

A més, el valor P és de 0,000, la qual cosa permet confirmar que la influència és significativa. Per altra banda, és interessant observar que l'exportació a França s'associa a que el sistema generi més del compte, la qual cosa vol dir que hi pot haver necessitat de vendre energia a l'exterior.

5.3.2.5.2 Significança entre la importació de França i el sentit

Tot seguit, es mostra l'estudi ANOVA de la importació a França amb el factor del sentit de desviament.

En el gràfic d'interval s'observa que, generalment, quan el sentit de desviament és -1 (el sistema genera més del compte) la importació de França ha estat més elevada.

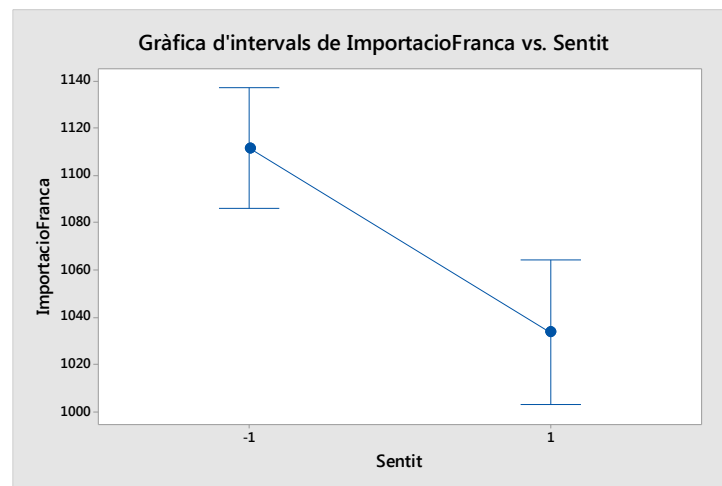


Figura 5.26. Gràfic d'interval de la importació a França vers el sentit de desviament del sistema. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

En el gràfic de diferència de mitjanes de Tukey, a la Figura 5.27., s'il·lustra un interval de diferències entre valors d'importació quan el sentit és 1 i valors d'importació quan el sentit és -1. En aquest cas, es veu com l'interval no conté el zero, per la qual cosa es pot afirmar que la influència de la importació a França sobre el sentit del desviament del sistema és significativa, ratificant així les primeres conclusions extretes de la Figura 5.26.

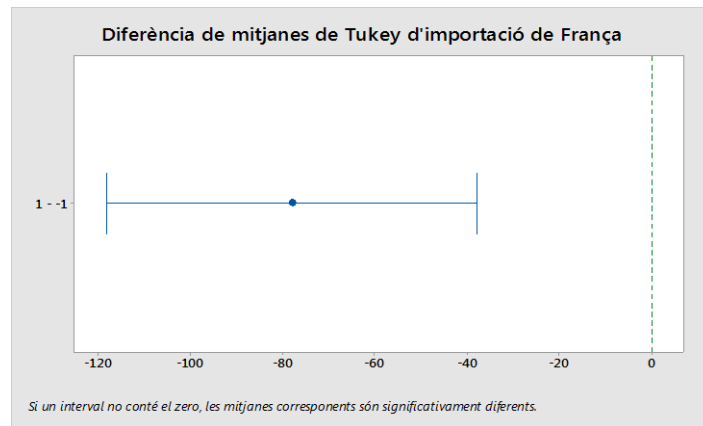


Figura 5.27. Gràfic de diferència de mitjanes de Tukey per la importació a França vers el sentit de desviament del sistema. S'observa que l'interval no conté el zero. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab.

A més, el valor P és 0,000, que és inferior a 0,05 i, per tant, es confirma que la influència de la importació a França en el sentit de desviament és significativa. Cal veure, també, que s'associa la importació a quan el sistema es queda curt de generació, la qual cosa pot dur a la necessitat de comprar energia provinent de França.

5.4. Conclusions de l'anàlisi estadística

Les primeres conclusions que es poden extreure del comportament del sentit de desviament en funció de les variables predictives proposades són les següents.

La quantitat d'energia produïda per cada tipus de generació és el factor que té una influència més significativa. L'energia nuclear i la cogeneració actuen de forma positiva envers al sistema, ja que com més generen més tendeix aquest a quedar-se llarg de generació, de totes maneres, la seva significança és baixa comparada amb la eòlica, que es comporta de la mateixa manera però de forma més pronunciada, això pot ser degut a la seva variabilitat respecte les altres dues, que són potència base.

En canvi, l'energia produïda mitjançant carbó, cicle combinat i hidràulica van associades a moments en què el sistema s'ha quedat curt de generació. Aquest fet té sentit si s'analitza des del punt de vista de la gestionabilitat del mètode de generació, ja que cap d'aquests són potència base, al contrari, són energies fàcils de gestionar i, per tant, un recurs a utilitzar per fer reajustaments de potència.

Cal dir que el tipus de generació que més significança té envers el sentit de desviament és el de carbó, seguit del cicle combinat.

És destacable, també, que el preu d'OMIE té certa influència pel que fa al sentit de desviament del sistema, però no sembla significativa, almenys de forma relativa i, per tant, no es farà servir aquesta variable com a predictiva. D'aquest fet se'n pot extreure la conclusió de que l'energia ajustada només depèn de variables físiques, i no pas econòmiques. Cal dir, a més, que la demanda tampoc té un efecte influent en aquest estudi, fet curiós si partim de la idea que el desviament és de generació-demanda, això implica que l'ajustament només és cosa de la generació.

Pel que fa a la banda de regulació secundària, tant si és a pujar com a baixar, tenen efecte de cara a que el sistema es quedi llarg de generació, la qual cosa és curiosa, sembla que haurien de ser complementaris. És possible que, més que el sentit, importi la quantitat d'energia disponible per a la regulació.

Per acabar, si s'analitza la influència que hi té la interconnexió amb França, s'observa que la influència és significativa també, de tal manera que si l'energia ajustada es dona pel fet que la generació es queda curta, l'energia importada és més elevada, contràriament al que passa amb l'energia exportada, la qual cosa té sentit.

6. SÈRIES TEMPORALS I PRIMERS MODELS

Abans de fer els primers models amb Minitab, cal analitzar més a fons les dades de les que es disposa.

Té sentit pensar que, per exemple, si en una hora concreta hi ha una quantitat de generació eòlica, és molt probable que a l'hora següent tingui un valor semblant. Aquesta interpretació es pot extrapolar amb la resta de variables predictives que s'han estudiat fins ara, així com amb les variables de resposta.

Així doncs, per realitzar un model més fiable cal, abans, independitzar les dades de la seva evolució temporal.

6.1. Sèries temporals

Una sèrie temporal és un conjunt d'observacions ordenades en el temps o, també, l'evolució d'un fenomen al llarg d'aquest. Cal dir que aquest és un camp extens dins de la ciència de dades i no és l'objectiu del projecte aprofundir-hi, de totes maneres, se n'ha extret la teoria útil per arribar a la finalitat d'aquest.

En una sèrie temporal es poden identificar quatre components teòriques, que no tenen per què existir totes, i que són la tendència, l'estacionalitat, els cicles i els residus. Cadascuna d'aquestes components és una funció del temps i l'anàlisi de sèries temporals consisteix en la separació i obtenció de cadascuna d'elles, així com determinar de quina manera es conjuguen per donar la sèrie original [12].

Es pren com a exemple la següent sèrie cronològica:

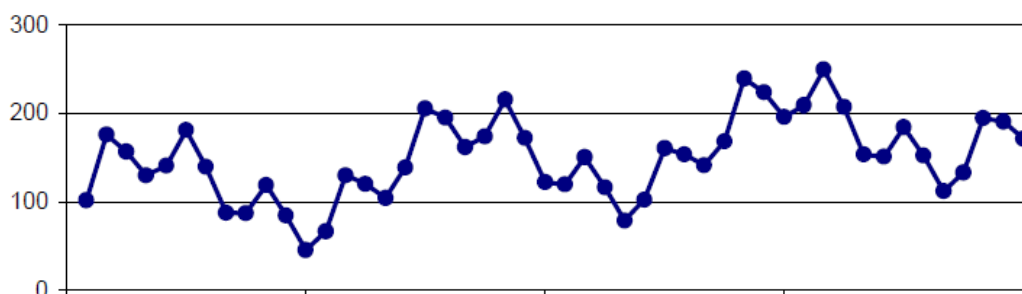


Figura 6.1. Sèrie temporal. – Font: [12]

La tendència és la component general a llarg termini i se sol expressar com una funció del temps de tipus polinòmic o logarítmic. En el cas de la figura 6.1., la seva tendència s'il·lustra a la figura 6.2.

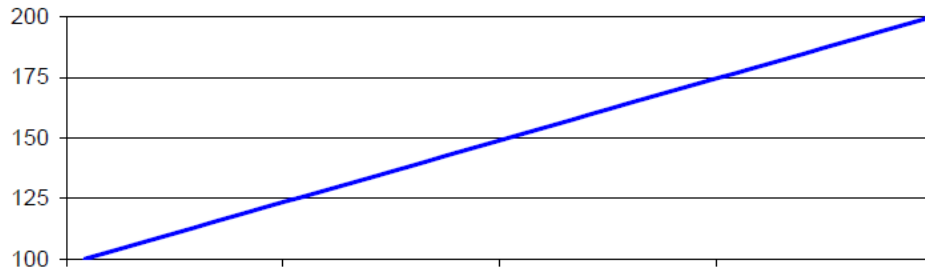


Figura 6.2. Tendència de la sèrie temporal presentada a la figura 6.1. – Font: [12]

Les variacions estacionals són oscil·lacions que es produeixen, i repeteixen, en períodes de temps curts. Poden estar associades a factors dinàmics, per exemple, l'ocupació hotelera, la venda de peces de robar, etc., evolució de les quals està clarament lligada a l'estacionalitat climàtica, de vacances, etc.

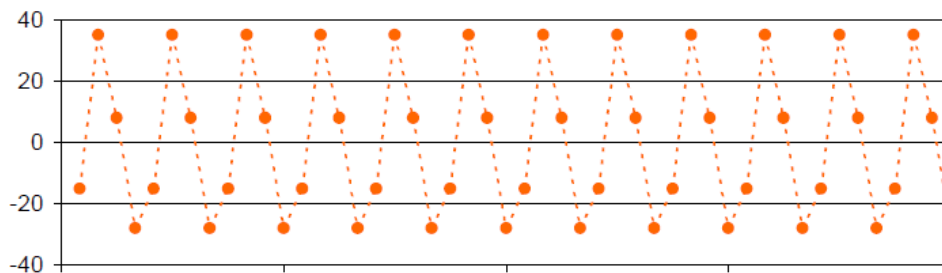


Figura 6.3. Estacionalitat de la sèrie temporal presentada a la figura 6.3. – Font: [12]

Les variacions cícliques es produeixen a llarg termini i solen anar lligades a etapes de prosperitat o recessions econòmiques. Solen ser més difícils d'identificar com més llarg sigui el seu període, degut, fonamentalment, a què el temps de recollida de dades no aporti prou informació.

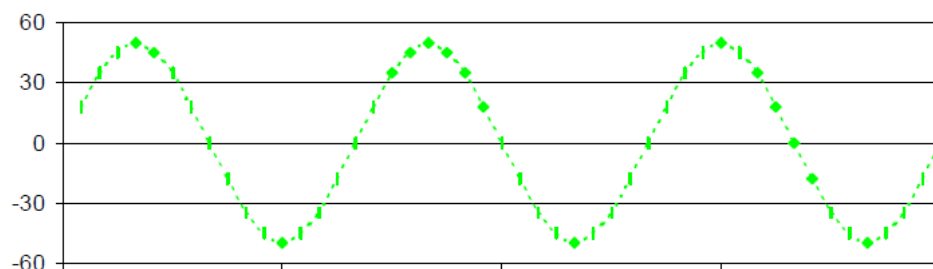


Figura 6.4. Cicle de la sèrie temporal presentada a la figura 6.4. – Font: [12]

La component residual és la que recull l'aportació aleatòria de qualsevol fenomen subjecte a l'atzar.

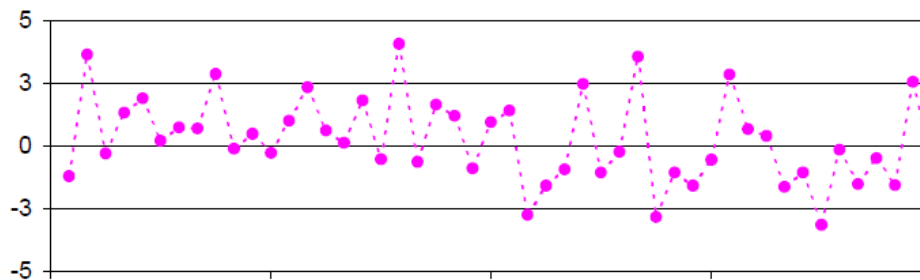


Figura 6.5. Component residual de la sèrie temporal presentada a la figura 6.5. – Font: [12]

El que es pretén, en els següents apartats, és identificar quines variables temporals són significatives en el sentit de desviament per tal de depurar l'efecte d'estacionalitat i autocorrelació que puguin tenir les dades utilitzades, assolint la seva independència temporal i, així, poder crear una regressió lineal més fiable.

Es suposa que en aquest cas no existeix component cíclica, ja que només es tenen dades de tres anys i mig, aproximadament, insuficient per identificar possibles cicles.

6.1.1. Estacionalitat: estudi de variables temporals

Té sentit pensar que les dades que s'han pres de REE de generació, que és la variable que més influència en el sentit de desviament, tal i com s'ha vist en el capítol anterior, tenen certa estacionalitat.

En el cas de les variables temporals, que són categòriques (hora del dia, mes de l'any, tipus de dia de la setmana...), és poc pràctic utilitzar el Minitab per comparar-les amb una altra variable categòrica, tal i com s'ha fet en el capítol anterior. D'aquesta manera, s'ha cregut més convenient fer servir el programari Qlik Sense que, tot i no ser un programa estadístic com el Minitab, és un visor de dades singular per la fàcil manipulació d'aquestes per visualitzar els gràfics desitjats.

Amb el Qlik Sense s'ha adaptat la dada "sentit del desviament" per aconseguir interpretar el percentatge, en tant per ú, de vegades que el desviament ha estat cap a un sentit o cap a l'altre. D'aquesta manera es poden identificar patrons temporals fàcilment.

Tot seguit, doncs, s'estudien les variables temporals per tal de detectar influència

significativa en el sentit de desviament.

6.1.1.1. Mes de l'any

S'ha cregut convenient estudiar l'estacionalitat del sentit del desviament en funció del mes de l'any, ja que, per exemple, la quantitat de generació de cada tipus de producció varia de forma estacional. En època de pluges hi ha més generació hidràulica, per exemple.

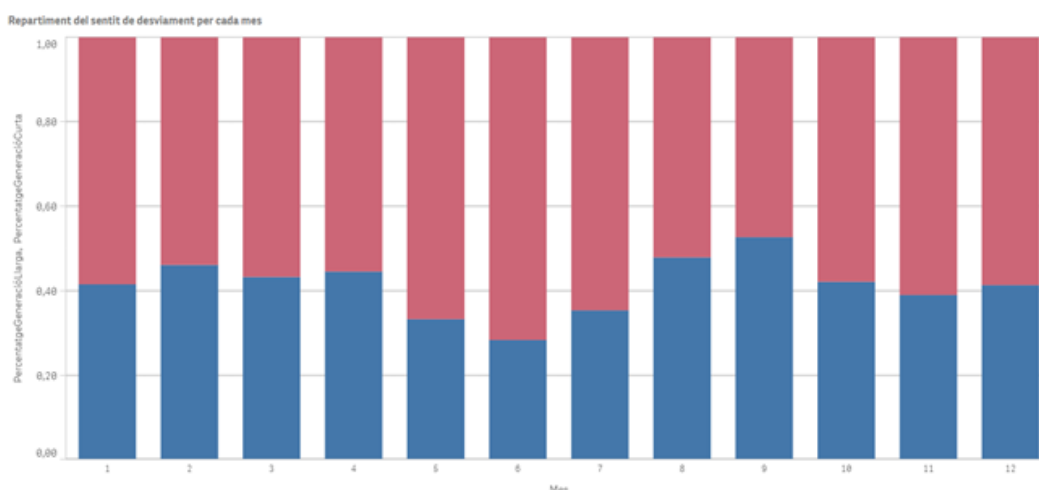


Figura 6.6. Sentit de desviament en tant per ú distribuït per mesos de l'any. En blau es representa el percentatge de vegades que el sistema genera més del compte i, en vermell, quan es queda curt. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Qlik Sense

A la Figura 6.6 s'observa certa estacionalitat en el sentit de desviament en funció dels mesos de l'any. Sembla ser que el sistema tendeix més a quedar-se curt de generació, de totes maneres aquesta tendència es veu més pronunciada en els mesos d'estiu.

6.1.1.2. Dia tipus de la setmana

S'ha decidit estudiar també la possibilitat d'influència significativa pel que fa al dia de la setmana, ja que podria ser que els desviaments seguissin algun tipus d'estacionalitat en aquest període com, per exemple, els caps de setmana.

A la Figura 6.7. s'observa que el tant per ú del sentit de desviament no varia de forma significativa en funció del dia de la setmana, sembla que hi ha una certa tendència a ser diferent els dissabtes, de totes maneres es considera poc important, tenint en compte que s'han de seleccionar el mínim de variables possibles, per tal de no saturar la regressió.

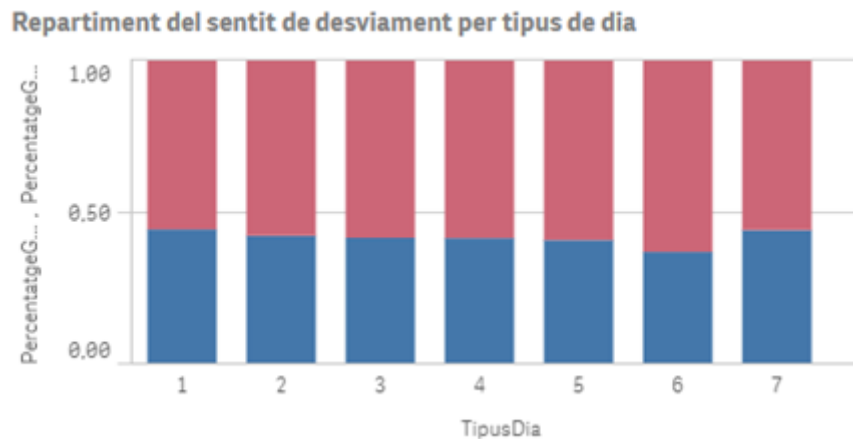


Figura 6.7. Sentit de desviament en tant per ú distribuït per dies de la setmana. En blau es representa el percentatge de vegades que el sistema genera més del compte i, en vermell, quan es queda curt. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Qlik Sense

6.1.1.3. Hora del dia

Té sentit pensar que el desviament es pot donar d'una manera o d'una altra en funció de l'hora del dia, podria ser que per la nit es comportés d'una manera i durant el dia, d'una altra. Per estudiar-ho s'ha realitzat el mateix gràfic.

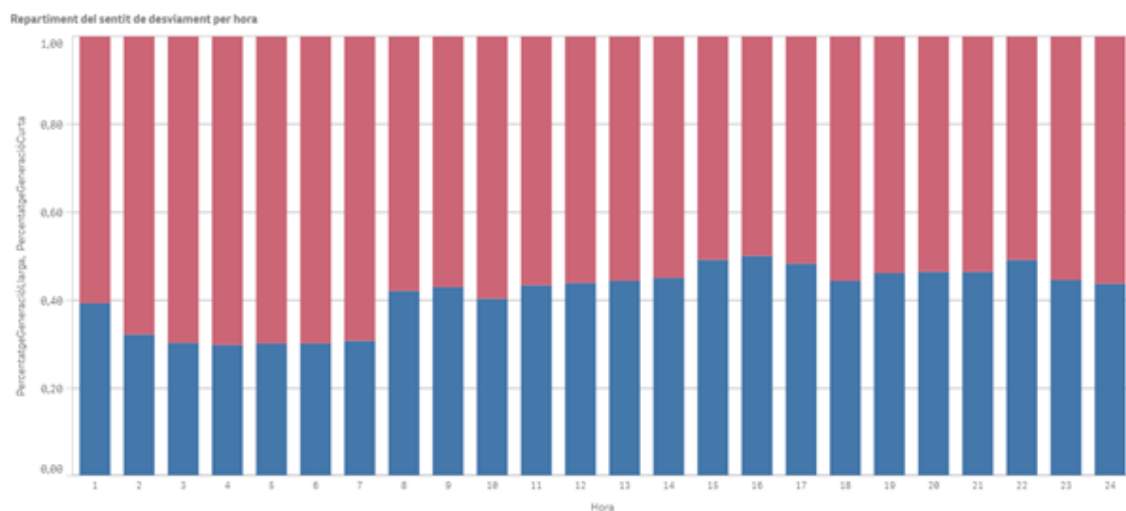


Figura 6.8. Sentit de desviament en tant per ú distribuït per hores del dia. En blau es representa el percentatge de vegades que el sistema genera més del compte i, en vermell, quan es queda curt. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Qlik Sense

A la Figura 6.8. s'observa com hi ha certa estacionalitat segons les hores del dia. Tal i com

s'ha comentat, el sistema tendeix més a quedar-se curt de generació, de totes maneres, aquesta tendència és més pronunciada durant les hores de nit.

Així doncs, s'arriba a la conclusió que les úniques variables temporals que afecten a les dades del projecte són les del mes de l'any i l'hora del dia. A continuació s'ha realitzat, mitjançant el Qlik Sense, un estudi de la interacció entre els mesos de l'any i les hores del dia.

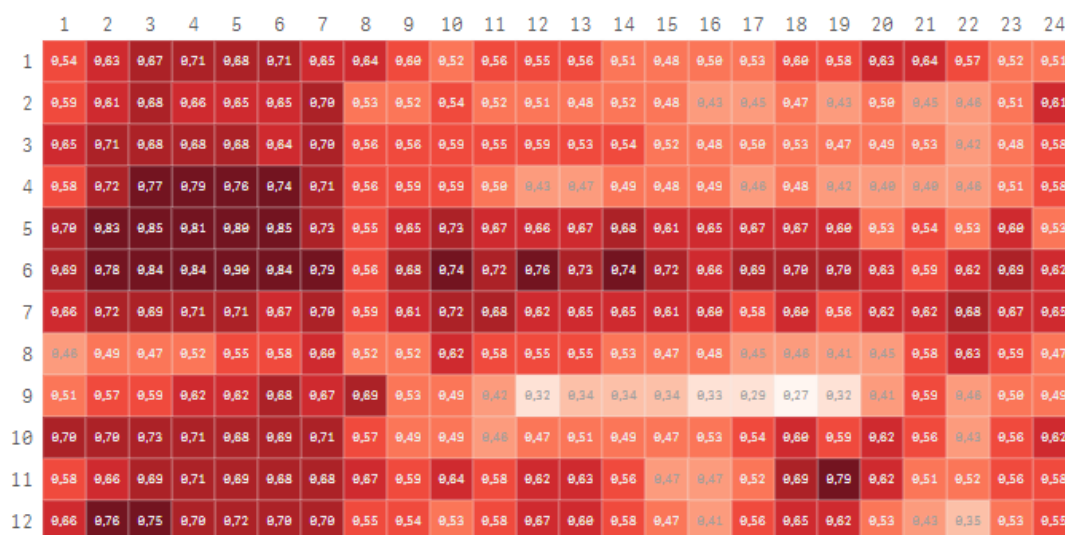


Figura 6.9. Percentatge, en tant per ú, de la probabilitat que té el sistema en quedar-se curt de generació en cada mes de l'any (files) i en cada hora del dia (columnes). Com més elevat és el to del degradat, més elevada és la probabilitat. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Qlik Sense.

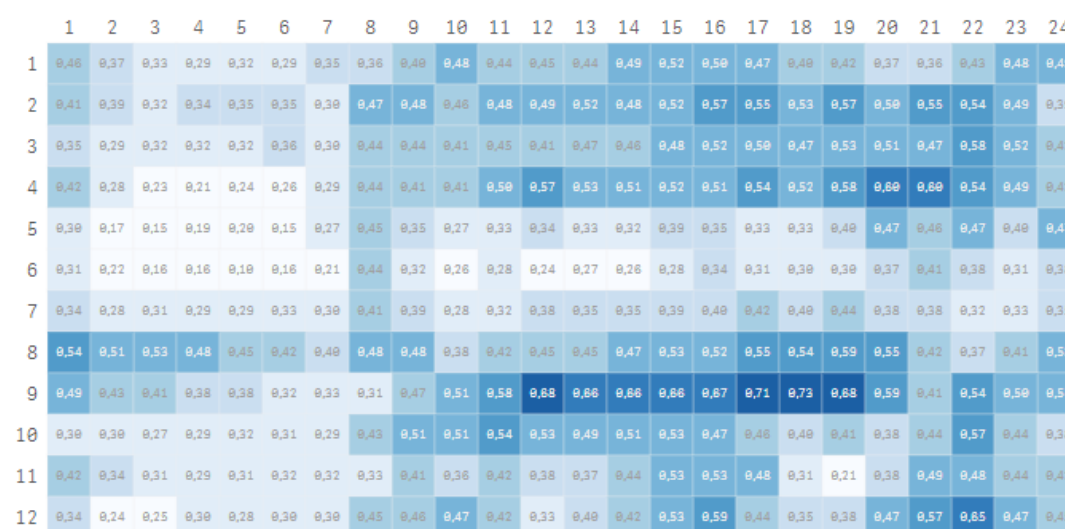


Figura 6.10. Percentatge, en tant per ú, de la probabilitat que té el sistema de generar més del compte en cada mes de l'any (files) i en cada hora del dia (columnes). Com més elevat és el to del degradat, més elevada és la probabilitat. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Qlik Sense.

Mitjançant les Figures 6.9. i 6.10., es pot ratificar la doble estacionalitat comentada. Generalment, hi ha més tendència a què el sistema es quedi curt de generació, de totes maneres, aquesta tendència s'incrementa pels mesos d'estiu i per les hores de nit, de forma independent.

Conèixer aquest fet ha permès depurar les dades per tal d'aconseguir la seva independència temporal i, a més, reduir-ne el nombre (si no, s'ha de treballar amb més de 28.000 dades). S'ha realitzat la mitjana de cada variable en cada hora del dia i en cada mes de l'any i, així, s'ha reduït significativament el nombre de dades a fer servir.

6.1.2. Regressió lineal múltiple mitjançant Minitab

Un cop es tenen les dades depurades i, per tant, les variables temporalment independents, s'ha decidit fer una regressió lineal múltiple mitjançant el Minitab, mostrada a la Figura 6.11.

De totes maneres, s'ha treballat amb l'energia ajustada com a variable de resposta, degut a les dificultats que presenta el Minitab per realitzar un model amb una resposta categòrica.

Ecuación de regresión

```
Ajust = 0,0201 GeneracióEòlica_P48 + 0,0351 GeneracióHidràulica_P48
- 0,0827 GeneracióCicleCombinat_P48 + 0,665 GeneracióCarbó_P48
- 0,270 GeneracióNuclear_P48 - 0,579 Cogeneració_P48 + 0,521 BandaBaixar
- 0,051 BandaPujar + 0,0 Mes_1 + 701 Mes_2 + 1504 Mes_3 + 1538 Mes_4 + 893 Mes_5
+ 161 Mes_6 - 251 Mes_7 + 62 Mes_8 - 97 Mes_9 - 143 Mes_10 - 676 Mes_11 - 458 Mes_12
+ 0,0 Hora_1 + 242,5 Hora_2 + 426 Hora_3 + 505 Hora_4 + 470 Hora_5 + 377 Hora_6
+ 183 Hora_7 - 72 Hora_8 - 100 Hora_9 - 139 Hora_10 - 221 Hora_11 - 273 Hora_12
- 265 Hora_13 - 228 Hora_14 - 242,8 Hora_15 - 226,6 Hora_16 - 160 Hora_17
- 112 Hora_18 - 201 Hora_19 - 256 Hora_20 - 295 Hora_21 - 336 Hora_22 - 227,9 Hora_23
- 94,8 Hora_24
```

Figura 6.11. Regressió lineal múltiple de l'energia ajustada en funció de les seves variables predictives, realitzada amb Minitab. Dades des de l'1 de gener de 2015 fins el 31 de desembre de 2017 – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab

Aquesta primera regressió mostra un valor de $R^2 = 82,09\%$. El valor de R^2 és un valor estadístic que determina com s'ajusta un model a la realitat, es considera que valors inferiors al 40% són dolents o regulars, entre 40% i 60%, acceptables i, a partir del 60%, prou bons.

Així doncs, sembla que el model realitzat és bo. Tot i així, no s'aconsella confiar en el valor R^2 per preveure variables. Cal, abans, fer comprovacions pròpies.

Aquesta regressió ha estat realitzada amb les dades d'entre els anys 2015 i 2017, i s'han fet servir les dades del 2018 per fer la comprovació. Aquesta s'ha basat en observar l'energia ajustada donada pel model i categoritzar-la, és a dir, si l'energia és positiva, el sentit de desviament és -1 (s'ha hagut d'aportar energia), i si l'energia és negativa, 1 (s'ha hagut de reduir energia). Un cop s'ha categoritzat la resposta, s'ha comparat amb les dades reals donades per REE.

El resultat de les previsions ha estat d'un total de 1593 encerts en front a un total de 2687 previsions, la qual cosa se li atorga a aquest model un 59,26% d'efectivitat.

Així doncs, no es considera la regressió lineal múltiple com a satisfactòria, ja que si es parteix des de res, la probabilitat d'encert és del 50%.

Els motius pels quals es creu que aquest model no és satisfactori són:

- La variable de resposta és numèrica i s'ha hagut de transformar després.
- El sistema no es comporta de forma lineal, de fet, és molt probable que les variables predictives interaccionin entre elles i tampoc ho facin de forma lineal.
- La regressió lineal múltiple no tolera bé l'ús de dades categòriques com les temporals.

6.1.3. Tendència i autocorrelació

Encara que per fer una regressió lineal convingui depurar les dades per fer-les temporalment independents, no es pot obviar el fet que cadascuna de les variables pot dependre del seu valor anterior, és per això que s'ha volgut analitzar també la component de la tendència i estudiar la possibilitat d'autocorrelació.

Tot seguit, a la Figura 6.12., es mostra el gràfic de l'anàlisi de la tendència del sentit del desviament que, pel que sembla, exposa un increment de proporció de vegades en què el sistema genera més del compte, partint d'un passat en què era molt més probable que es quedés curt.

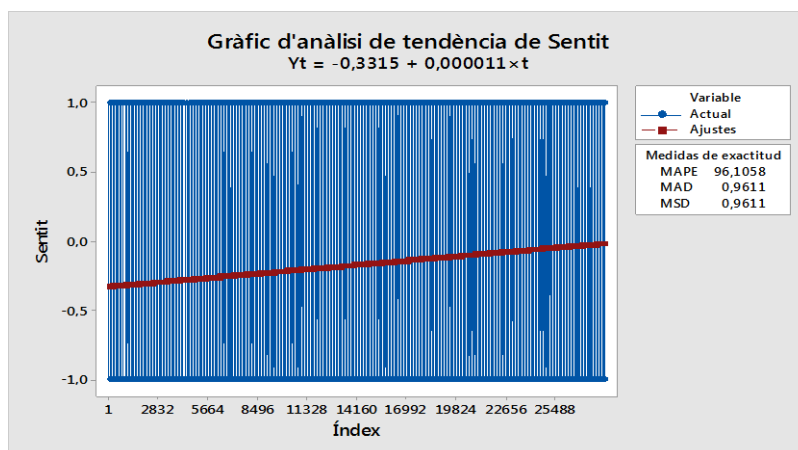


Figura 6.12. Gràfic d'anàlisi de tendència del sentit de desviament. En vermell es representa la recta de tendència i, en blau, els valors mesurats, units per línies de connexió. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab

Tal i com s'ha argumentat que les variables predictives poden presentar autocorrelació, és a dir, que el valor depengui dels valors anteriors, com ara la generació eòlica, també s'ha volgut considerar la possibilitat que el sentit del desviament pugui presentar un comportament similar.

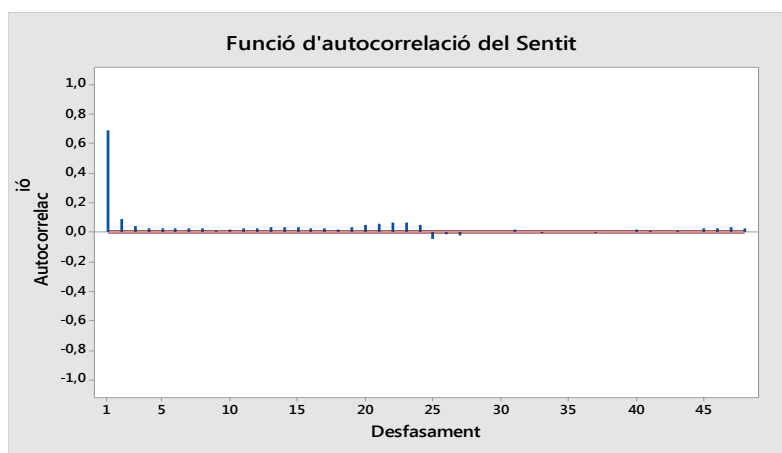


Figura 6.13. Funció d'autocorrelació del sentit del desviament. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Minitab

A la Figura 6.13 es mostra el grau d'autocorrelació del sentit de desviament. S'interpreta de la següent manera: el desfasament indica l'índex de la dada presa que, en aquest cas, són les hores. Les barres verticals indiquen el grau d'autocorrelació, si superen la línia vermella indica que influeixen en la següent resposta.

Així doncs, s'observa que justament les dues hores anteriors influeixen de manera

significativa a la resposta futura, així com ho fan les hores anàlogues del dia anterior.

És per això que s'ha decidit fer dos models en què només hi intervingui la mateixa resposta.

- El primer d'ells tracta de, simplement, retornar el mateix sentit del desviament que hi ha hagut a la mateixa hora del dia anterior, és a dir, $\text{sentit}_{t_{Hj}} = \text{sentit}_{t_{Hj}} (D-1)$. S'ha fet la comprovació de la mateixa manera que en la regressió lineal múltiple, és a dir, comparant la resposta amb la donada per REE, aquest cop sense transformació prèvia. El resultat ha estat d'un 60,92% d'efectivitat, millor que la regressió, això implica que el sentit del desviament és una variable altament autocorrelacionada. De totes maneres, se segueix considerant un resultat no satisfactori. Els motius pels quals es creu que no ho és són:
 - Les dades de les hores del dia anterior no són prou vàlides.
 - Falta tenir en compte altres factors, com ara les variables predictives exposades en el capítol 6.
- El segon tracta de retornar el mateix sentit del desviament que hi ha hagut justament a l'hora anterior, és a dir, $\text{sentit}_H = \text{sentit}_{H-1}$. Un cop feta la comprovació, el resultat ha estat sorprenent, d'un 84,78% d'encerts. Tot i així, aquest model no pot ser real, ja que la dada del sentit del desviament de l'hora anterior no està disponible.

6.2. Conclusions de l'estudi temporal

Les conclusions que s'extreuen de l'estudi de les variables temporals i dels primers models són diverses.

Primerament, la tendència indica que cada cop és més equilibrada la proporció d'un sentit i un altre, ja que anteriorment la probabilitat que el sistema es quedés curt de generació era més alta.

A més, hi ha certa estacionalitat de forma mensual i de forma horària, essent els mesos d'estiu en els que hi ha més probabilitat de que el sistema es quedi curt de generació i, independentment i anàloga, les hores de nit.

Per acabar, el sentit del desviament és una variable que presenta una forta autocorrelació,

és per això que cal tenir present que l'ordre en què es presenten les dades és important.

De totes maneres, els primers models que s'han fet no resulten satisfactoris, ja sigui perquè no es poden implementar per falta de dades, perquè la variable de resposta no és exactament la que es busca, o bé perquè l'efectivitat es considera insuficient. A més, les dades que s'han fet servir són les de tancament (P48) i, en un model real s'haurien de fer servir dades prèvies.

7. MODELS PREDICTIUS: *MACHINE LEARNING*

Els models que s'han vist fins ara no són satisfactoris, ja sigui per falta de dades a temps real, per efectivitat insuficient, o bé perquè el format de la resposta no és el desitjat. De totes maneres, s'han fet amb dades de tancament (P48), la qual cosa no es pot donar si el que es vol és implementar el model, en tot cas s'hauria de fer amb dades reals de previsió, com ara el Programa Horari Final (PHF).

Així doncs, una diferència que es pot identificar entre el model predictiu, que és el motiu d'aquest apartat, i els altres models és que les dades que es faran servir seran dades predictives a temps real, no seran dades de tancament de REE, sinó que simplement disposarem de suposicions.

Per tal de realitzar un model com el plantejat, programaris com el Minitab deixen de ser útils, si bé és veritat que aquest té alguna opció per fer prediccions, no és la seva tasca específica. Cal dir, però, que l'estudi previ de variables significatives és essencial per dur a terme un model predictiu.

7.1. Introducció al *Machine Learning*

És en aquest context en què entra en joc el *Machine Learning* o Aprenentatge Automàtic. Cal dir que aquest és un camp extens dins de la ciència de dades, en aquest projecte se n'ha extret la part necessària per poder fer la predicció, però no s'hi aprofundeix.

Es fa servir el terme *Machine Learning* per referir-se a la creació i l'ús de models que són apresos mitjançant les pròpies dades. L'objectiu és l'ús de dades existents per desenvolupar models que poden ser útils per preveure variables de resposta futures mitjançant variables predictives actuals [13].

De totes maneres, s'ha de tenir present que gran part del temps invertit en crear un model és pel tractament de dades [14], és a dir, ordenar les dades, triar les que realment importen, transformar-les en categòriques o numèriques segons convingui, crear-ne de noves a partir de les disponibles, depurar-les de males mesures, etc. Part d'aquesta feina ja s'ha fet, ja que es tenen clares les variables predictives a utilitzar i ja es coneix el patró que segueix el sentit del desviament en funció d'aquestes.

Els models de *Machine Learning* tenen una forma de funcionar que els caracteritza en front

la resta. Tal i com s'ha dit, són models que aprenen de les pròpies dades, i aquest fet és literal. Quan es fa servir un algoritme, s'escull el percentatge de dades que es vol que faci servir per entrenar-se, és a dir, trobar patrons i relacions entre les variables d'entrada i de sortida, i un altre bloc de dades que fa servir per examinar-se.

Cal tenir present, però, que s'ha d'anar en compte en no caure en la sobrealimentació o *overfitting* [15], és a dir, fer servir massa dades per l'entrenament. La sobrealimentació genera models que s'ajusten perfectament a les dades amb les que s'entrena, però que això pot comportar problemes per la predicció quan les dades predictives varien una mica del normal.

Quan ja es tenen les dades preparades per l'aplicació en el model, només cal saber escollir un algoritme que sigui vàlid pels objectius plantejats, que se senti còmode amb les dades donades i saber adaptar aquestes dades a les necessitats de l'algoritme, així com saber-lo interpretar.

7.2. Algoritmes de *Machine Learning*

Saber escollir bé l'algoritme a fer servir és tan o més important que el tractament de dades previ. Hi ha algoritmes que serveixen per aprendre de dades en què es disposa de la resposta que hi ha hagut (com és el cas d'aquest projecte), n'hi ha que no disposen de dades prèvies de resposta, n'hi ha que s'adapten bé amb variables categòriques i n'hi ha que no. A la Figura 7.1. s'il·lustren diferents algoritmes i aconsella quins fer servir en funció de les dades de les que es disposa i quin objectiu es té.

L'esquema de la figura ajuda a escollir l'algoritme a fer servir. En el projecte en qüestió es disposa de més de 50 dades, per tant, es pot fer servir algun algoritme, a més, la intenció és preveure una categoria, és a dir, el sentit del desviament. Tot seguit, es demana si es disposa de dades de resposta històriques, és a dir, si és un model que es pot entrenar amb dades passades, com que és el cas, s'arriba a la conclusió que l'algoritme que s'ha de fer servir és de tipus classificador.

També és interessant veure que, en cas que interessi preveure la quantitat d'energia ajustada, en comptes de fer servir un algoritme de tipus classificador s'hauria de fer servir un algoritme de tipus regressor.

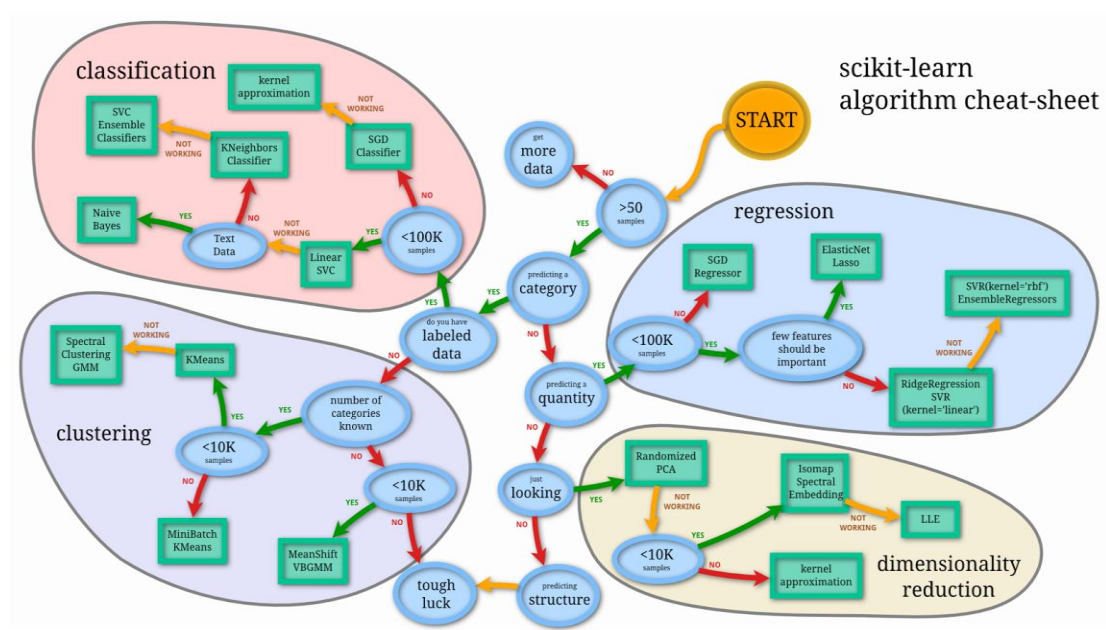


Figura 7.1. Diagrama usat per escollir quin tipus d'algoritme cal fer servir. – Font: [13]

Tot i així, un altre factor que s'ha de tenir present, sobretot tenint en compte les conclusions dels capítols anteriors, és que ha de ser un algoritme que no estigui restringit per la linealitat. A més, s'ha de buscar algun algoritme que se senti còmode treballant amb variables predictives categòriques i numèriques alhora.

7.2.1. Arbres de decisió

Els arbres de decisió, o *Decision Tree*, fan servir una estructura d'arbre per representar un nombre de possibles "camins de decisió" i una resposta diferent per a cada camí [13].

Un exemple de situació en què pot ser adient fer servir un arbre de decisió és per crear un procés de selecció d'un candidat per treballar a una empresa. Si té un bon CV se'l cita a fer una entrevista, si no, es descarta. Si fa bé l'entrevista es mira l'experiència que pugui tenir al sector, si no, se li dóna una altra oportunitat i es fa una dinàmica de grup, etc. Fins que s'arriba a la conclusió de si es contracta aquest candidat o no.

Tot seguit, s'il·lustra un arbre de decisió per tal de facilitar el procés de selecció d'un candidat.

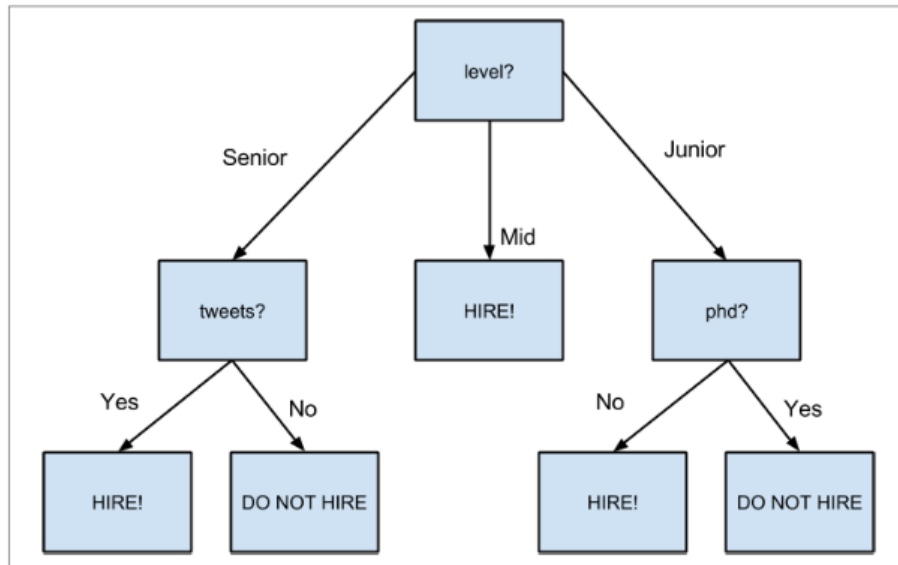


Figura 7.2. Arbre de decisió utilitzat per contractar o no un candidat – Font: [13]

El mateix sistema es pot fer servir per jugar al joc de “¿Quién es quién?”, per exemple.

Aquests exemples senzills no es corresponen a la magnitud de dades i complexitat que té el projecte en qüestió, però són útils per entendre bé el funcionament dels arbres de decisió. De totes maneres, es poden construir arbres realment extensos [16].

Els motius pels quals s'explica aquest algoritme són els següents:

- Pot actuar com a algoritme classificador o regressor, segons interressi. Aquesta versatilitat pot ser interessant en el cas d'estudi, ja que es disposa de la variable de resposta en format categòric (sentit del desviament) i en format numèric (energia ajustada).
- Treballa còmodament amb dades categòriques i amb dades numèriques i de forma simultània.
- No és un algoritme lineal, la qual cosa és interessant, ja que en apartats anteriors s'ha arribat a la conclusió que un model lineal era limitat per estudiar el cas d'aquest projecte.
- És senzill d'entendre.

De totes maneres, els arbres de decisió tenen desavantatges importants. Per una banda, és molt complicat, computacionalment, trobar un arbre de decisió òptim o prou bo mitjançant l'entrenament amb dades, i per altra banda, és molt fàcil crear un arbre sobrealimentat amb les dades d'entrenament, la qual cosa implica que no faci bones

prediccions amb noves entrades.

7.2.2. Algoritme escollit: *Random Forest*

Els arbres de decisió, per molt bé que es puguin ajustar a les dades per les quals s'entrena, és un algoritme rígid que no s'adapta bé a noves entrades i, per tant, és fàcil que les seves prediccions no siguin bones, per això es diu que tendeixen a sobrealimentar-se.

De totes maneres, hi ha un algoritme que dona solució a aquest problema, s'anomena *Random Forest*. El *Random Forest* funciona amb la mateixa lògica que els arbres de decisió, amb la diferència que fa servir múltiples arbres, de tal manera que s'elimina la rigidesa i, per tant, no es corre el risc de sobrealimentació.

Cada arbre és construït amb dades diferents, amb entrades inicials diferents, i amb prioritats i opcions diferents, de tal manera que cada arbre és diferent de la resta. D'aquí ve el nom de *Forest*.

A més, s'entra i es surt dels arbres de forma totalment aleatòria, sense reciclar idees apreses amb anterioritat i sense cap ordre concret, de tal manera que cada arbre és independent, d'aquí ve el nom de *Random*. Aquest atribut també permet a l'algoritme veure amb bons ulls les series temporals, ja que ja detecta per ell sol les tendències i estacionalitats.

En l'explicació de l'algoritme dels arbres de decisió s'ha fet servir l'exemple del procés de selecció d'un candidat per treballar a una hipotètica empresa. La diferència entre el *Decision Tree* i el *Random Forest* es pot explicar d'una manera igual d'intuïtiva: el procés de selecció, mitjançant un arbre de decisió, podria començar amb una entrevista, a partir de la qual ja es podrien descartar candidats. Fent servir el *Random Forest*, cada candidat faria més d'una entrevista, cadascuna amb entrevistadors totalment diferents, amb prioritats i preguntes diferents, de tal manera que es decideix contractar el candidat que hagi estat escollit més vegades [16].

Degut a la seva senzillesa, la seva versatilitat i la seva precisió, el *Random Forest* és un algoritme àmpliament acceptat i recomanat.

7.3. Model predictiu del sentit del desviament

Per realitzar el model predictiu s'ha fet servir el llenguatge Python, mitjançant la interfície Jupyter. S'ha escollit aquest llenguatge per familiarització prèvia a través del grau

universitari.

A més, el Python té una sèrie de llibreries preparades per implementar algorismes de *Machine Learning* com “sklearn” i per la manipulació de dades com “dataframe”. Tal i com s’ha comentat, l’abast del projecte no inclou l’aprofundiment teòric en les eines fetes servir per aconseguir l’objectiu.

7.3.1. Dades horàries disponibles, models horaris

La idea del model és poder preveure amb la màxima exactitud possible el sentit del desviament del sistema de forma horària.

Cal tenir present que durant el dia hi ha mercats intradiaris de compra per poder fer correccions en funció de com evolucionen les previsions. Cada sessió intradiària té assignada una franja horària concreta i amb noves dades de programació disponibles, tal i com es veu a la Taula 7.1.

Taula 7.1. Franja d'actuació de les sessions intradiàries i publicació del Programa Horari Final (PHF) respectiu.- Font: Elaboració pròpia

	Disponibilitat de dades PHF			
	Franja d'actuació intradiari		Publicació PHF	
Intradiari 1	17:00	18:45	20:45	Dia D-1
Intradiari 2	21:00	21:45	23:45	
Intradiari 3	1:00	1:45	3:45	Dia D
Intradiari 4	4:00	4:45	6:45	
Intradiari 5	8:00	8:45	10:45	
Intradiari 6	12:00	12:45	14:45	
Intradiari 7	17:00	18:45	20:45	

És per això que s’ha decidit fer un submodel per cadascuna de les sessions intradiàries. Aquests submodels estaran subjectes a les hores que moren de forma imminent, és a dir, que ja no s’hi podrà realitzar moviments. En l’intradiari 1 encara hi haurà l’oportunitat de l’intradiari 2 per comprar les primeres hores del dia, amb les dades PDVP i PHF1. En canvi, a partir de llavors, les 4 primeres hores del dia ja hauran mort, és a dir, ja no s’hi podrà realitzar cap moviment. D’aquesta manera, per l’intradiari 3 es realitzarà el submodel per

les hores 5, 6, 7 i 8, ja que són les següents hores que moriran. Es realitzaran, doncs, sis submodels de manera successiva. A la Taula 7.2., s'aprecien millor les hores que moren després de cada sessió intradiària, així com les dades disponibles que hi haurà per cada submodel, que prendran el nom del seu intradiari.

Taula 7.2. Dades disponibles de cada submodel. Es poden apreciar les hores que moren després de cada sessió intradiària.- Font: Elaboració pròpia

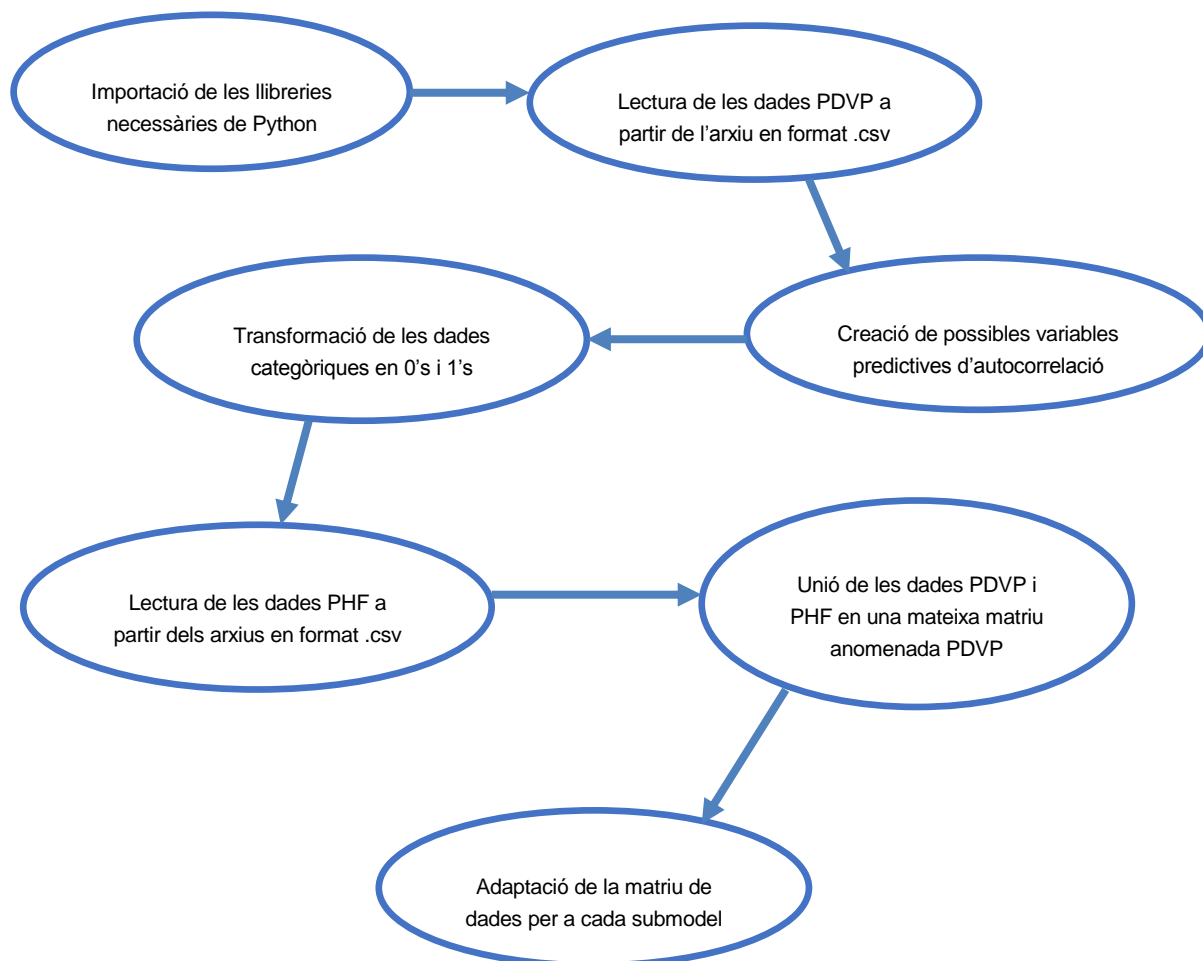
	Hores dia D	Diari	SUBMODELS					
			Intra2	Intra3	Intra4	Intra5	Intra6	Intra7
DADES DISPONIBLES PER FRANJA HORÀRIA	1	PDVP	PHF_1					
	2	PDVP	PHF_1					
	3	PDVP	PHF_1					
	4	PDVP	PHF_1					
	5	PDVP	PHF_1	PHF_2				
	6	PDVP	PHF_1	PHF_2				
	7	PDVP	PHF_1	PHF_2				
	8	PDVP	PHF_1	PHF_2				
	9	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3			
	10	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3			
	11	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3			
	12	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4		
	13	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4		
	14	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4		
	15	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4		
	16	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	
	17	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	
	18	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	
	19	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	
	20	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	
	21	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	
	22	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	PHF_6
	23	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	PHF_6
	24	PDVP	PHF_1	PHF_2	PHF_3	PHF_4	PHF_5	PHF_6

7.3.2. Diagrama de blocs del model

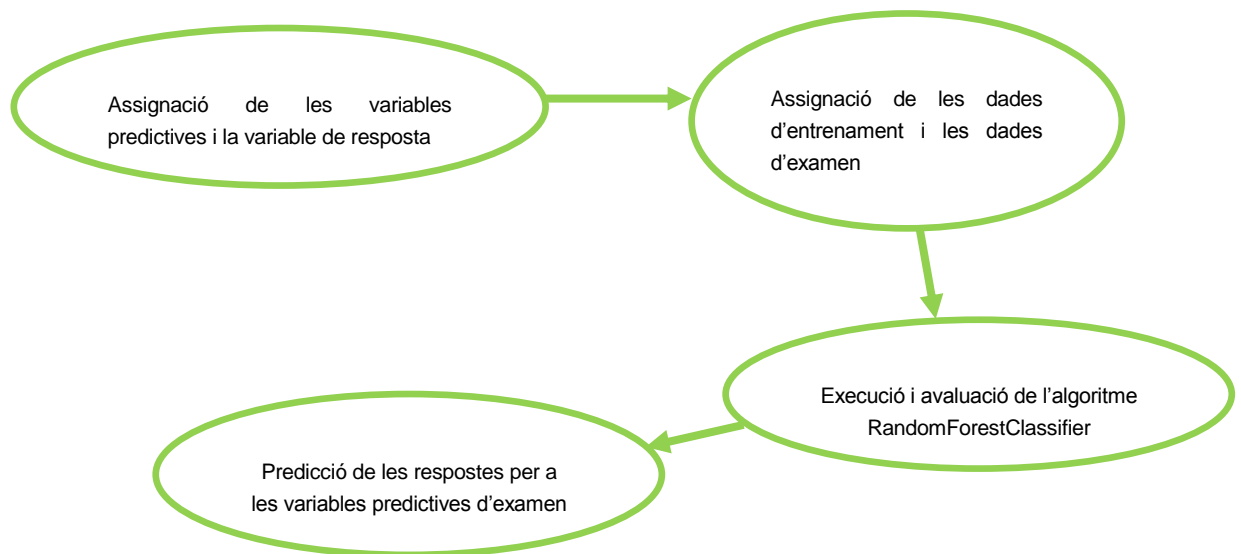
En aquest subapartat s'explica de forma esquemàtica la construcció del model. De totes maneres, es pot consultar el codi sencer i amb comentaris a l'annex I.

Cal observar que gran part del model es basa en la preparació de les dades per tal que l'algoritme s'hi senti còmode.

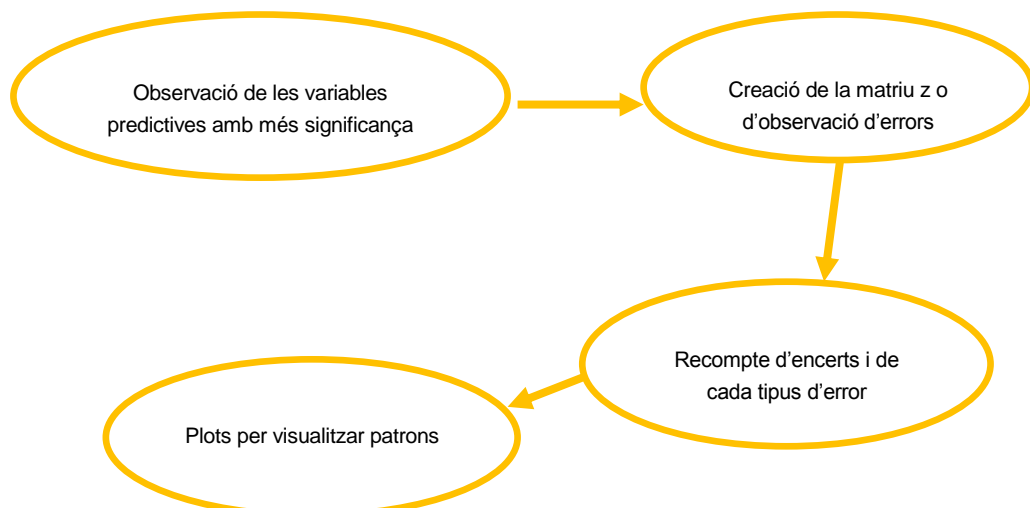
- Preparació de la matriu de dades i de cada submodel



- Execució de cada submodel



- Anàlisi de les respostes



7.3.3. Resultats

En aquest apartat s'analitzen els resultats de cadascun dels sis models. S'observa que tots ells presenten resultats d'un 80% d'efectivitat, aproximadament. Així doncs, es considera el model com a satisfactori.

7.3.3.1. Model sessió intradiària 2

El model INTRA 2 té una efectivitat del 80,51%, amb un total de 190 encerts, 11 errors en què preveu que el sistema genera més del compte i en realitat es queda curt, i 35 errors en què preveu que el sistema es queda curt però que en realitat genera més del compte, tal i com es veu a la Figura 7.4. S'observa, doncs, que l'error més freqüent és el d'aquest segon tipus.

També s'ha comprovat que no hi ha cap patró temporal pel que fa als errors, la qual cosa palesa l'aleatorietat de l'algoritme, tal i com es veu a la Figura 7.3.

A la Taula 7.3 es poden observar les variables predictives que més influència tenen sobre les respostes. Cal destacar l'elevada proporció atorgada a la variable "HoraTemps", la qual serveix per identificar l'autocorrelació del sentit del desviament. A més, les variables que la segueixen són totes de tipologies de generació, sense una desproporció cap a cap en concret, tal i com s'esperava, ja que estan totes interrelacionades. Es nota, també, que les variables temporals no tenen tanta significança com s'esperava.

Taula 7.3. Taula d'importàncies pel model INTRA 2.

– Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

	importancia
HoraTemps	0.087584
Cogeneracio_PHF_1	0.066674
GeneracioEolica_PDVP	0.065461
GeneracioEolica_PHF_1	0.065223
GeneracioNuclear_PHF_1	0.064211
GeneracioNuclear_PDVP	0.063127
GeneracioCicleCombinat_PDVP	0.062634
Cogeneracio_PDVP	0.062570
GeneracioCarbo_PHF_1	0.062054
GeneracioCarbo_PDVP	0.059041
GeneracioHidraulica_PDVP	0.058707
GeneracioCicleCombinat_PHF_1	0.058419
GeneracioHidraulica_PHF_1	0.057587
BandaPujar	0.044917
BandaBaixar	0.040522
Agost	0.013265
Hora1	0.008007
Gener	0.005798
Hora2	0.005227

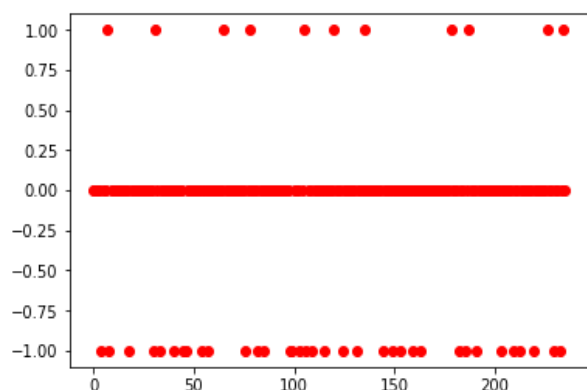


Figura 7.3. Resultats del model INTRA 2, ordenats per ordre temporal. Els resultats iguals a zero són les previsions correctes, els 1's són previsions de que el sistema es queda llarg però en realitat es queda curt i, els -1's, a l'inrevés.- Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

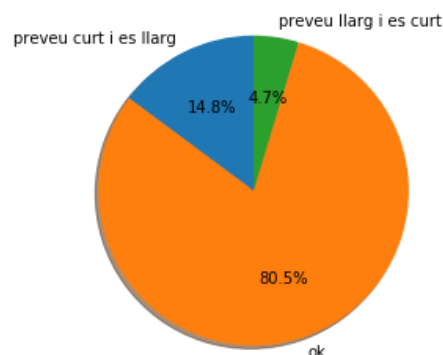


Figura 7.4. Resultats del model INTRA 2, distribuïts en percentatge segons encerts i tipus d'error.- Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

7.3.3.2. Model sessió intradiària 3

El model INTRA 3 té una efectivitat del 80,08%, amb un total de 189 encerts, 14 errors en què preveu que el sistema genera més del compte i en realitat es queda curt, i 33 errors en què preveu que el sistema es queda curt però que en realitat genera més del compte, tal i com es veu a la Figura 7.6. S'observa, doncs, que l'error més freqüent torna a ser el d'aquest segon tipus.

També s'ha comprovat que tampoc hi ha cap patró temporal pel que fa als errors, la qual cosa palesa l'aleatorietat de l'algoritme, tal i com es veu a la Figura 7.5.

A la Taula 7.4 es poden observar les variables predictives que més influència tenen sobre les respostes. Cal destacar l'elevada proporció atorgada a la variable "HoraTemps", la qual serveix per identificar l'autocorrelació del sentit del desviament. A més, les variables que la segueixen són totes de tipologies de generació, sense una desproporció cap a cap en concret, tal i com s'esperava, ja que estan totes interrelacionades. Aquest cop, les proporcions d'importància estan més redistribuïdes, ja que hi ha més variables predictives.

Taula 7.4. Taula d'importàncies pel model INTRA 3.

– Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

	importancia
HoraTemps	0.061371
GeneracioCicleCombinat_PDVP	0.047919
Cogeneracio_PDVP	0.047435
GeneracioEolica_PHF_2	0.047434
GeneracioEolica_PDVP	0.047200
GeneracioHidraulica_PDVP	0.047169
GeneracioEolica_PHF_1	0.047114
Cogeneracio_PHF_2	0.046510
Cogeneracio_PHF_1	0.046191
GeneracioHidraulica_PHF_2	0.046091
GeneracioHidraulica_PHF_1	0.045206
GeneracioCicleCombinat_PHF_1	0.044590
GeneracioCicleCombinat_PHF_2	0.044133
GeneracioCarbo_PHF_1	0.044011
GeneracioCarbo_PHF_2	0.043789
GeneracioNuclear_PDVP	0.042655
GeneracioCarbo_PDVP	0.042577
GeneracioNuclear_PHF_1	0.041110
GeneracioNuclear_PHF_2	0.040576
BandaPujar	0.037679
BandaBaixar	0.033897
Hora8	0.009508
Agost	0.004815
Hora7	0.004520

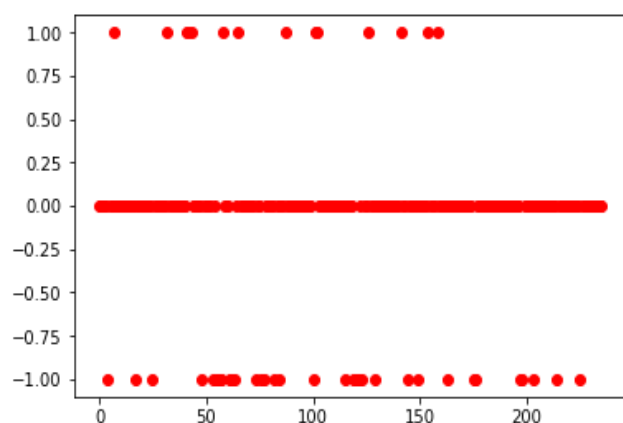


Figura 7.5. Resultats del model INTRA 3, ordenats per ordre temporal. Els resultats iguals a zero són les previsions correctes, els 1's són previsions de que el sistema es queda llarg però en realitat es queda curt i, els -1's, a l'inrevés. - Font: Elaboració pròpia mitjançant Python.

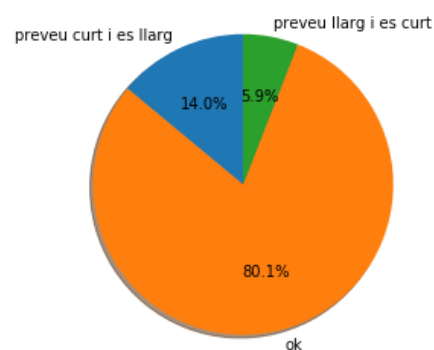


Figura 7.6. Resultats del model INTRA 3, distribuïts en percentatge segons encerts i tipus d'error. - Font: Elaboració pròpia mitjançant Python.

7.3.3.3. Model sessió intradiària 4

El model INTRA 4 té una efectivitat del 76,27%, amb un total de 135 encerts, 16 errors en què preveu que el sistema genera més del compte i en realitat es queda curt, i 26 errors en què preveu que el sistema es queda curt però que en realitat genera més del compte, tal i com es veu a la Figura 7.7. S'observa, doncs, que l'error més freqüent torna a ser el d'aquest segon tipus. A part, es veu també que aquest model és el que té pitjor resultat, essent l'únic que està per sota del 80%.

També s'ha comprovat que tampoc hi ha cap patró temporal pel que fa als errors, la qual cosa palesa l'aleatorietat de l'algoritme, tal i com es veu a la Figura 7.6.

A la Taula 7.5 es poden observar les variables predictives que més influència tenen sobre les respostes. La variable "HoraTemps", torna a ser la més influent pel que fa a la predicció, però té menys pes a causa del major nombre de dades del que disposa aquest model. Les variables que la segueixen són totes de tipologies de generació, sent prioritàries les dades de carbó i cogeneració.

Taula 7.5. Taula d'importàncies pel model INTRA 4.

– Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

	importancia
HoraTemps	0.052928
GeneracioCicleCombinat_PDVP	0.040269
GeneracioCarbo_PHF_3	0.038239
Cogeneracio_PDVP	0.037735
GeneracioCarbo_PHF_2	0.037462
Cogeneracio_PHF_3	0.037435
GeneracioCarbo_PHF_1	0.037092
Cogeneracio_PHF_2	0.036667
GeneracioNuclear_PHF_2	0.036291
GeneracioCicleCombinat_PHF_3	0.035594
GeneracioNuclear_PDVP	0.035545
GeneracioNuclear_PHF_3	0.035528
GeneracioHidraulica_PDVP	0.035428
GeneracioCarbo_PDVP	0.035210
GeneracioHidraulica_PHF_1	0.034776
GeneracioEolica_PHF_1	0.034689
GeneracioNuclear_PHF_1	0.034567
Cogeneracio_PHF_1	0.034514
GeneracioHidraulica_PHF_2	0.034096
GeneracioEolica_PHF_2	0.033762
GeneracioEolica_PHF_3	0.033701
GeneracioHidraulica_PHF_3	0.033669
GeneracioCicleCombinat_PHF_2	0.033315
GeneracioEolica_PDVP	0.033206
GeneracioCicleCombinat_PHF_1	0.033157
BandaPujar	0.029481
BandaBaixar	0.023668
Hora9	0.006357

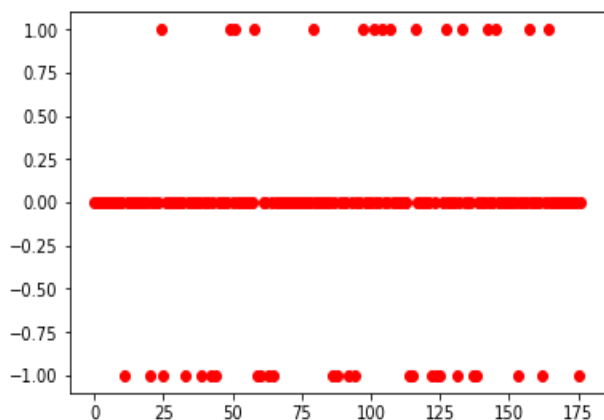


Figura 7.7. Resultats del model INTRA 4, ordenats per ordre temporal. Els resultats iguals a zero són les previsions correctes, els 1's són previsions de que el sistema es queda llarg però en realitat es queda curt i, els -1's, a l'inrevés.- Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

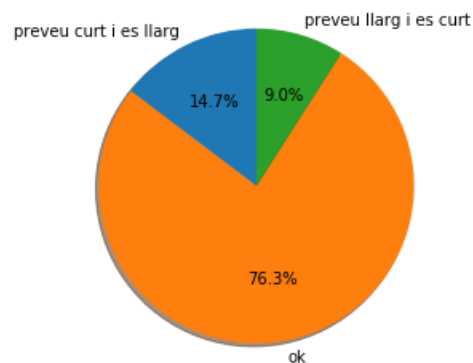


Figura 7.8. Resultats del model INTRA 4, distribuïts en percentatge segons encerts i tipus d'error.- Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

7.3.3.4. Model sessió intradiària 5

El model INTRA 5 té una efectivitat del 83,47%, amb un total de 197 encerts, 14 errors en què preveu que el sistema genera més del compte i en realitat es queda curt, i 25 errors en què preveu que el sistema es queda curt però que en realitat genera més del compte, tal i com es veu a la Figura 7.10. S'observa, doncs, que l'error més freqüent torna a ser el d'aquest segon tipus.

També s'ha comprovat que tampoc hi ha cap patró temporal pel que fa als errors, la qual cosa palesa l'aleatorietat de l'algoritme, tal i com es veu a la Figura 7.9.

A la Taula 7.6 es poden observar les variables predictives que més influència tenen sobre les respostes. La variable "HoraTemps", segueix sent la més influent pel que fa a la predicció, però té menys pes a causa del major nombre de dades del que disposa aquest model. Les variables que la segueixen són totes de tipologies de generació, sent prioritària l'evolució del cicle combinat.

Taula 7.6. Taula d'importàncies pel model INTRA 5.

– Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

	importancia
HoraTemps	0.045110
GeneracioCicleCombinat_PDVP	0.037101
Cogeneracio_PDVP	0.033088
Cogeneracio_PHF_1	0.031697
GeneracioCicleCombinat_PHF_2	0.031014
GeneracioCicleCombinat_PHF_4	0.030978
GeneracioCicleCombinat_PHF_1	0.030780
GeneracioCicleCombinat_PHF_3	0.030582
Cogeneracio_PHF_4	0.030351
GeneracioCarbo_PHF_4	0.029978
GeneracioCarbo_PHF_1	0.029928
Cogeneracio_PHF_3	0.029859
Cogeneracio_PHF_2	0.029676
GeneracioCarbo_PDVP	0.029327
GeneracioCarbo_PHF_2	0.029228
GeneracioNuclear_PDVP	0.029144
GeneracioCarbo_PHF_3	0.029082
GeneracioHidraulica_PDVP	0.028313
GeneracioNuclear_PHF_4	0.027940
GeneracioHidraulica_PHF_1	0.027755
GeneracioHidraulica_PHF_4	0.027599
GeneracioNuclear_PHF_3	0.027418
GeneracioEolica_PDVP	0.027007
GeneracioNuclear_PHF_1	0.026999
GeneracioEolica_PHF_1	0.026909
GeneracioNuclear_PHF_2	0.026773
GeneracioHidraulica_PHF_3	0.026685
GeneracioEolica_PHF_2	0.026190
GeneracioEolica_PHF_4	0.026185

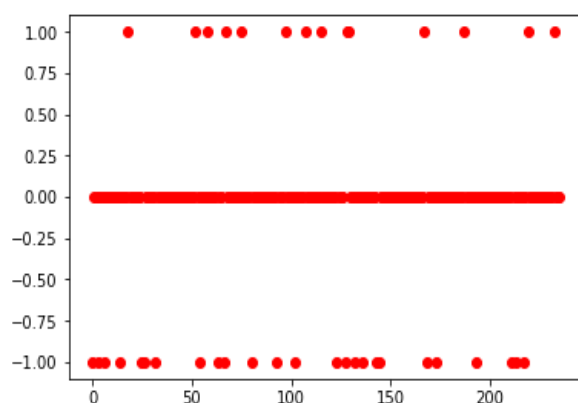


Figura 7.9. Resultats del model INTRA 5, ordenats per ordre temporal. Els resultats iguals a zero són les previsions correctes, els 1's són previsions de que el sistema es queda llarg però en realitat es queda curt i, els -1's, a l'inrevés. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

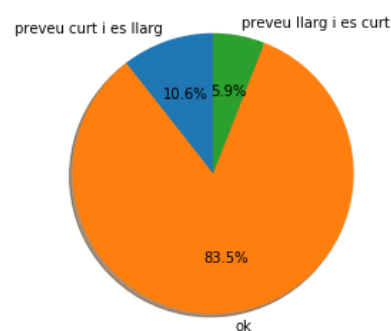


Figura 7.10. Resultats del model INTRA 5, distribuïts en percentatge segons encerts i tipus d'error. – Font: Elaboració pròpia mitjançant Python.

7.3.3.5. Model sessió intradiària 6

El model INTRA 6 té una efectivitat del 83,89%, amb un total de 297 encerts, 27 errors en què preveu que el sistema genera més del compte i en realitat es queda curt, i 30 errors en què preveu que el sistema es queda curt però que en realitat genera més del compte, tal i com es veu a la Figura 12. S'observa, en aquest cas, que no hi ha un tipus d'error més freqüent que l'altre. Aquest model és el que té una efectivitat major, això pot ser degut a la disponibilitat de més dades per entrenar-se, ja que la sessió intradiària 6 és la que comprèn la franja horària més gran.

També s'ha comprovat que tampoc hi ha cap patró temporal pel que fa als errors, la qual cosa palesa l'aleatorietat de l'algoritme, tal i com es veu a la Figura 11.

A la Taula 7.7 es poden observar les variables predictives que més influència tenen sobre les respostes. La variable "HoraTemps", segueix sent la més influent pel que fa a la predicció, aquest cop amb un augment d'influència respecte l'anterior model. Les variables que la segueixen són totes de tipologies de generació.

Taula 7.7. Taula d'importàncies pel model INTRA 6.

–Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

	importancia
HoraTemps	0.055467
GeneracioCicleCombinat_PDVP	0.029509
GeneracioCarbo_PDVP	0.027527
Cogeneracio_PDVP	0.027254
GeneracioNuclear_PHF_5	0.026329
Cogeneracio_PHF_1	0.026060
Cogeneracio_PHF_2	0.026010
GeneracioCarbo_PHF_1	0.025764
GeneracioNuclear_PHF_1	0.025658
GeneracioNuclear_PHF_3	0.025627
GeneracioNuclear_PDVP	0.025508
GeneracioNuclear_PHF_4	0.025506
GeneracioCarbo_PHF_2	0.025266
Cogeneracio_PHF_3	0.025215
Cogeneracio_PHF_5	0.025090
GeneracioCarbo_PHF_5	0.025077
Cogeneracio_PHF_4	0.024815
GeneracioCarbo_PHF_4	0.024654
GeneracioNuclear_PHF_2	0.024603
GeneracioEolica_PHF_1	0.023976
GeneracioCarbo_PHF_3	0.023860
GeneracioEolica_PDVP	0.023768
GeneracioEolica_PHF_2	0.023680
GeneracioEolica_PHF_4	0.023338
GeneracioCicleCombinat_PHF_5	0.023111
GeneracioEolica_PHF_5	0.023087
GeneracioCicleCombinat_PHF_1	0.023048
GeneracioCicleCombinat_PHF_4	0.022852
GeneracioHidraulica_PDVP	0.022798

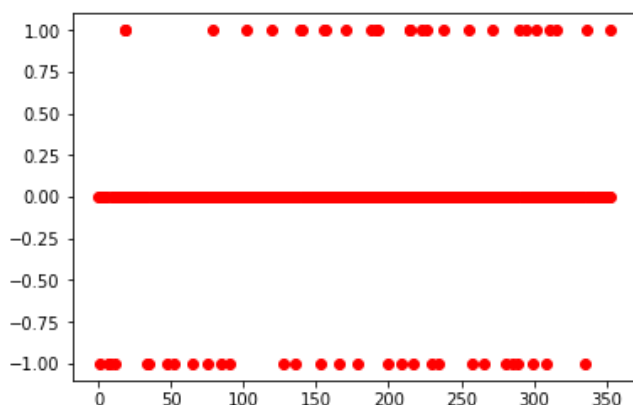


Figura 7.11. Resultats del model INTRA 6, ordenats per ordre temporal. Els resultats iguals a zero són les previsions correctes, els 1's són previsions de que el sistema es queda llarg però en realitat es queda curt i, els -1's, a l'inrevés.- Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

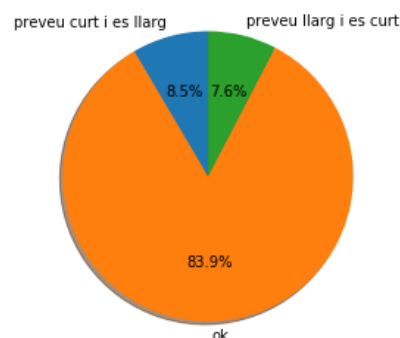


Figura 7.12. Resultats del model INTRA 6, distribuïts en percentatge segons encerts i tipus d'error. –Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

7.3.3.6. Model sessió intradiària 7

El model INTRA 7 té una efectivitat del 80,79%, amb un total de 143 encerts, 19 errors en què preveu que el sistema genera més del compte i en realitat es queda curt, i 15 errors en què preveu que el sistema es queda curt però que en realitat genera més del compte, tal i com es veu a la Figura 7.14. S'observa, en aquest cas, que la freqüència de tipologia d'error s'inverteix.

També s'ha comprovat que tampoc hi ha cap patró temporal pel que fa als errors, la qual cosa palesa l'aleatorietat de l'algoritme, tal i com es veu a la Figura 7.13.

A la Taula 7.8 es poden observar les variables predictives que més influència tenen sobre les respostes. La variable "HoraTemps", segueix sent la més influent pel que fa a la predicció, també amb la mateixa proporció que en el model anterior. Les variables que la segueixen són totes de tipologies de generació, prioritzant, en aquest cas, l'evolució de la cogeneració.

Taula 7.8. Taula d'importàncies pel model INTRA 7.-

Font: Elaboració pròpia mitjançant Python

	importancia
HoraTemps	0.059894
Cogeneracio_PDVP	0.025451
Cogeneracio_PHF_3	0.025314
GeneracioCicleCombinat_PDVP	0.024975
Cogeneracio_PHF_2	0.024944
Cogeneracio_PHF_1	0.024580
Cogeneracio_PHF_6	0.024278
Cogeneracio_PHF_4	0.024088
Cogeneracio_PHF_5	0.023843
GeneracioEolica_PHF_6	0.023219
GeneracioCarbo_PHF_6	0.021407
GeneracioEolica_PHF_5	0.021392
GeneracioEolica_PHF_1	0.021242
GeneracioNuclear_PDVP	0.021237
GeneracioNuclear_PHF_5	0.021116
GeneracioCarbo_PHF_4	0.020977
GeneracioEolica_PHF_4	0.020821
GeneracioCarbo_PHF_5	0.020784
GeneracioNuclear_PHF_4	0.020703
GeneracioEolica_PHF_3	0.020641
GeneracioCarbo_PDVP	0.020535
GeneracioEolica_PDVP	0.020501
GeneracioNuclear_PHF_2	0.020259
GeneracioNuclear_PHF_3	0.020202
BandaBaixar	0.020148
GeneracioNuclear_PHF_6	0.020094
GeneracioCarbo_PHF_1	0.020087
GeneracioNuclear_PHF_1	0.020019
GeneracioCarbo_PHF_2	0.019938

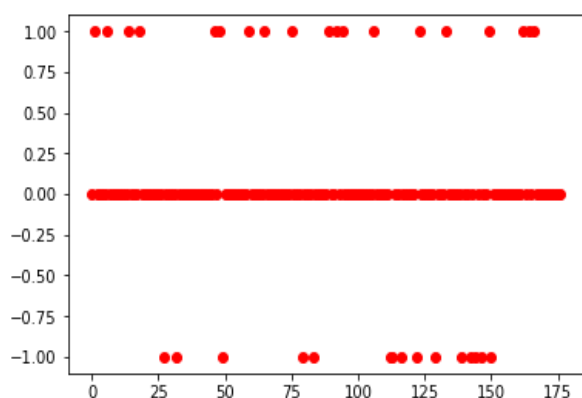


Figura 7.13. Resultats del model INTRA 7, ordenats per ordre temporal. Els resultats iguals a zero són les previsions correctes, els 1's són previsions de que el sistema es queda llarg però en realitat es queda curt i, els -1's, a l'inrevés.- Font: Elaboració pròpia mitjançant

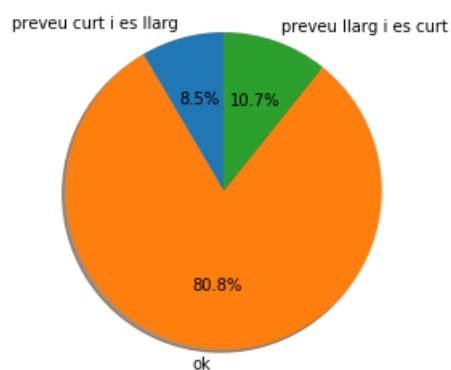


Figura 7.14. Resultats del model INTRA 7, distribuïts en percentatge segons encerts i tipus d'error.-Font: Elaboració pròpia mitjançant Python.

8. POSSIBLE IMPLEMENTACIÓ A UNA COMERCIALIZADORA

En aquest capítol es presenten els impactes que podria tenir una possible implementació del model predictiu del sentit del desviament del sistema en una comercialitzadora elèctrica.

Tot i que l'estudi ha estat ideat per Aura Energia, es presenten les conclusions de forma genèrica, sense dades concretes de cap comercialitzadora.

8.1. Impacte econòmic

Com s'ha comentat anteriorment, el cost del desviament és un cost propi per a cada comercialitzadora i es calcula com:

$$\text{Cost desviament propi} = \frac{\text{Penalització per desviament [€]}}{\text{Energia total consumida [MWh]}}$$

Així doncs, és un cost que depèn de l'energia consumida i del desviament. Tot i així, cal diferenciar el desviament que penalitza del que no, ja que el model presentat no ajuda a no desviar-se, sinó a desviar-se convenientment per no pagar penalització. D'aquesta manera es pot definir la penalització com:

$$\text{Penalització} = \text{Energia consumida [MWh]} \cdot \% \text{ desviament penalització} \cdot \text{Cost desviament sistema} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$$

Els factors propis de cada comercialitzadora en la penalització són l'energia consumida i el percentatge de desviament que penalitza (desviament perjudicial pel sistema). En canvi, el cost de desviament del sistema és comú per a tots els participants.

El factor que es redueix mitjançant la implementació del model és el percentatge de desviament que penalitza. El model és capaç de preveure amb un 80% d'encerts el sentit del desviament i, si es considera que cada cop que s'encerta la comercialitzadora aconsegueix desviar-se convenientment mitjançant la modificació de la compra, el percentatge de desviament que penalitza passa a ser del 20%.

Considerant que, abans de la implementació, el percentatge és del 50% (probabilitat

binària), això implica una reducció total en el cost de penalització d'un 40%:

$$\text{Reducció} = \frac{\text{Energia consumida [MWh]} \cdot 0,2 \cdot \text{Cost desviament sistema} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]}{\text{Energia consumida [MWh]} \cdot 0,5 \cdot \text{Cost desviament sistema} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]}$$

$$\text{Reducció} = \frac{\text{Penalització després [€]}}{\text{Penalització abans [€]}} = 0,4$$

Tenint en compte que es redueix en un 40% la penalització per desviament de la comercialitzadora, es pot afirmar que, un cop implementat el model:

$$\text{Cost desviament propi amb model} = 0,6 \cdot \text{Cost desviament propi sense model}$$

De totes maneres, s'ha volgut posar un exemple monetari per fer l'estudi més visual.

Es considera una comercialitzadora que compra anualment 500.000 MWh i té cost de desviament del 0,8 €/MWh del preu final de l'energia. Això implica una penalització per desviament de:

$$\text{Penalització} = \text{Cost desviament propi} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] \cdot \text{Energia consumida [MWh]}$$

$$\text{Penalització} = 400.000 \text{ [€/any]}$$

Si aquesta penalització es veu reduïda en un 40% després d'implementar el model:

$$\text{Penalització amb model} = 0,6 \cdot 400.000 \left[\frac{\text{€}}{\text{any}} \right] = 240.000 \left[\frac{\text{€}}{\text{any}} \right]$$

L'estalvi anual generat pel model en aquesta comercialitzadora en concret és de 160.000 €.

8.1.1. Pressupost

Pel que fa al pressupost, cal tenir presents diversos aspectes.

Primerament, s'han de tenir en compte possibles adquisicions de programari. S'han fet servir un total de 3 programes: el Minitab, el Qlik Sense i el Python. Pel Minitab s'ha fet servir la llicència d'estudiant proporcionada per la UPC. Pel que fa al Qlik Sense, en canvi, la compra del programa val uns 15000 euros més 500 euros per llicència. Finalment, el Python és programari lliure i no té cap cost associat.

Taula 8.1. Pressupost en concepte d'ús de programari.

Concepte	Preu unitari [€]	Unitats	Total [€]
Minitab	0	1	0
Qlik Sense	15.500	1	15.500
Python	0	1	0
Total			15.500

Per altra banda, s'ha d'incloure el cost de la maquinària. S'ha fet servir un ordinador de l'equip d'Aura Energia, el cost del qual s'aproxima a uns 400 euros.

Taula 8.2. Pressupost en concepte d'equipaments.

Concepte	Preu unitari [€]	Unitats	Total [€]
Ordinador	400	1	400
Total			400

Per acabar, s'ha de fer recompte de les hores de feina. El projecte s'ha realitzat en un període de tres mesos, aproximadament, durant el qual s'ha treballat una mitjana de 5 hores diàries cinc dies la setmana, la qual cosa implica unes 300 hores de feina. Es considera un sou mig de 8 € l'hora per a estudiants en pràctiques de la UPC.

Taula 8.3. Pressupost en concepte de recursos humans

Concepte	Preu unitari [€/hora]	Hores	Total [€]
Recursos humans	8	300	2.400
Total			2.400

Tenint en compte tots els conceptes, el pressupost total del projecte és d'uns 18.300 €.

8.2. Impacte ambiental

La implementació del model a una comercialitzadora no sembla que hagi de presentar cap impacte ambiental directe. De totes maneres, s'ha de tenir present que l'energia que s'ajusta per equilibrar els desviaments del sistema prové majoritàriament, tal i com s'ha vist, del carbó i del cicle combinat.

El model no és útil per reduir el desviament de la comercialitzadora, si no que serveix per decidir el com s'ha de desviar. De totes maneres, el fet de desviar-se “en favor” del sistema fa que sí que es redueixi l'energia que s'ha d'ajustar durant els serveis d'ajustament, per la qual cosa, el desviament general del sistema elèctric sí que es disminueix.

Al necessitar menys energia d'ajustament que, tal i com s'ha comentat, prové majoritàriament de cicles combinats i carbó, es pot afirmar que el model pot arribar a fer un impacte positiu pel medi ambient pel que fa a emissions de CO₂.

Així doncs, tot i que resulta complicat quantificar l'impacte ambiental del model, es podria dir que una possible implementació seria, en la seva mesura, positiva.

9. CLOENDA

Després de realitzar l'estudi del comportament del desviament del sistema, s'ha arribat a diverses conclusions que es redacten tot seguit. De totes maneres, i tot i haver complert l'objectiu, es creu que el model de predicció encara es pot millorar, i és per això que es presenten diverses idees per tal de seguir desenvolupant el projecte.

9.1. Conclusions

Amb la realització d'aquest projecte s'ha arribat a la conclusió que el sentit del desviament generació-demanda del sistema elèctric segueix diversos patrons.

S'ha vist que aquest desviament depèn, sobretot, de la quantitat de cada tipus de generació que es dona en cada franja horària. De fet, s'ha aconseguit classificar la tipologia de generació en funció de si afavoreix que el sistema generi més del compte o bé que es quedi curt. Més concretament, s'ha vist que més producció d'eòlica, nuclear i cogeneració, influencien de forma significativa a què el sistema hagi de fer una reducció de producció pel que fa a la programació, ja que són tipus de generació poc gestionables. En canvi, quan fa falta una aportació de més energia, es fan servir cicles combinats, carbó i hidràulica, la qual cosa té sentit perquè són mètodes de producció amb una resposta ràpida. Per altra banda, també s'ha vist que el sentit de desviament és una variable que presenta una forta autocorrelació.

A més, s'ha comprovat que el sistema tendeix més a quedar-se curt de producció, però que aquesta tendència és més pronunciada en els mesos d'estiu i en les hores de nit. Per tal d'arribar a aquests resultats ha estat necessari informar-se sobre les series temporals, la qual cosa aporta valor afegit d'aprenentatge.

Es fa una valoració molt positiva del procés de realització del model, ja que s'han après nocions de *Machine Learning*, un camp molt extens dins la ciència de dades. Partint de la ignorància d'aquesta metodologia, s'ha pogut comprovar l'efectivitat, la utilitat i la projecció de futur que té aquest camp.

Per acabar, i no per això menys important, s'han après i consolidat conceptes sobre el funcionament del sistema elèctric, sobretot pel que fa als mercats d'ajustament.

9.2. Oportunitats de millora

Tot i que s'hagi assolit l'objectiu inicial, s'han observat potencials estudis de futur per tal de complementar, millorar o ampliar el model realitzat.

Per una banda, és podria ser que hi hagi alguna variable predictiva que no s'hagi tingut en compte i que quedi pugui ajudar a millorar l'efectivitat del model.

També cal comentar que el projecte realitzat és teòric, caldria pensar com es podria implementar a una comercialitzadora. En principi, mitjançant la descàrrega automàtica de dades es podria aconseguir.

A més, tampoc és segur que s'hagi escollit el millor algoritme per realitzar el model, ja que el *Random Forest* s'ha aplicat, sobretot, per senzillesa, popularitat i perquè s'adapta a les demandes de les dades i del sistema. Però és probable que hi hagi algoritmes més adequats pel cas específic del projecte. Un possible treball futur seria la comparació dels resultats entre diferents algoritmes de previsió.

Per altra banda, s'ha plantejat la idea de crear un model que no només pugui preveure el sentit del desviament del sistema, sinó que també sigui capaç de preveure la quantitat d'energia ajustada, per tal de saber en quina mesura s'ha de regular la compra en cada sessió intradiària. Aquest model, que és molt semblant a l'altre i que es presenta a l'annex II, s'ha realitzat aplicant un algoritme diferent, el *Random Forest Regressor*. De totes maneres, els seus resultats són menys bons que els del primer model, ja sigui perquè la resposta és numèrica i no categòrica, o perquè puntuar l'efectivitat és més complex quan hi ha cert error. És així com s'ha pensat que els valors previstos pel primer es podrien fer servir com a variable predictiva pel segon, realitzant, així, una espècie de model en cadena que podria incrementar significativament la precisió de predicció de l'energia ajustada. Aquest assaig queda, doncs, pendent en futurs estudis.

Finalment, s'ha de tenir present que a mitjans de juny de 2018 entra en vigor l'aplicació del model continu de les compres intradiàries [17], la qual cosa implica l'inici d'una transició cap a una semblança al model europeu. Caldria, doncs, analitzar altre cop la utilitat de les previsions del sentit del desviament, de totes maneres, es creu que els efectes d'aquest canvi tardaran en començar-se a notar.

Agraïments

M'agradaria mostrar la meua gratitud a l'equip tècnic d'Aura Energia, ja sigui per la proposta de la temàtica del projecte com per tota la formació prèvia necessària per fer-lo, així com el suport durant la seva realització.

També m'agradaria agrair la tutoria, el consell i el seguiment del projecte per part de l'Eduardo Prieto i el Pol Olivella.

Referències bibliogràfiques

- [1] **J. Gallego, C., i Victoria, M.** *Entiende el mercado eléctrico*. Observatorio Crítico de la Energía (Octubre 2012).
- [2] **Justo Rojas, E.** *Mercado de servicios de ajustes del sistema eléctrico*. Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid. (Juny 2013).
- [3] **Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico.** *Las renovables generaron el 41% en España en 2016*. (Gener 2017). En línia: <https://www.evwind.com/2017/01/01/las-renovables-generaron-el-41-en-espana-en-2016/>
- [4] **Red Eléctrica de España.** *Seguimiento de la demanda de energía eléctrica*. En línia: <https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demanda/total>
- [5] **Red Eléctrica de España.** *Los mercados de servicios de ajuste del sistema eléctrico peninsular español*. (Maig 2015).
- [6] **Energía y sociedad, las claves del sector energético.** *Mecanismos de ajuste de demanda y producción*. En línia: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/6-5-mecanismos-de-ajuste-de-demanda-y-produccion/>
- [7] **AEQ.** *Mercado eléctrico III: Los servicios de ajuste del sistema peninsular*. (Febrero 2018). En línia: <https://www.aeqenergia.com/blog/mercado-electrico-iii-los-servicios-de-ajuste-del-sistema-electrico-peninsular>
- [8] **Red Eléctrica de España.** *ESIOS: sistema de información del operador del sistema*. En línia: https://www.esios.ree.es/es/analisis/762?vis=1&start_date=21-05-2018T00%3A00&end_date=27-05-2018T23%3A50&compare_start_date=20-05-2018T00%3A00&groupby=hour
- [9] **Professors de l'assignatura Tècniques Estadístiques per a la Qualitat.** *Apuntes completos estadística*. (Setembre 2013). ETSEIB
- [10] **Pardo, A.** *ANOVA de un factor, capítulo 14*. (Setembre 2000).
- [11] **Minitab.** *Soporte técnico de Minitab 18*. (2017). En línia: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/>
- [12] **Pepió Viñals, M.** *Series temporales*. Centre de Recursos de Suport a la Docència. (2001). Edicions UPC

- [13] **Grus, J.** *Data science from scrath: first principles with Python*. (Abril 2015)
- [14] **Mayo, M.** *7 Steps to Mastering Machine Learning with Python*. KD nuggets (2015). En línia: <https://www.kdnuggets.com/2015/11/seven-steps-machine-learning-python.html>
- [15] **Ray, S.** *Build a Predictive Model in 10 minutes*. Analytics Vidhya (Setembre 2015). En línia: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2015/09/build-predictive-model-10-minutes-python/>
- [16] **Analytics Vidhya Content Team.** A Complete Tutorial on Tree Based Modeling from Scatch. (Abril 2016). En línia: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2016/04/complete-tutorial-tree-based-modeling-scratch-in-python/>
- [17] **OMIE.** *Resolución de 9 de mayo de 2018, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se aprueban las reglas de funcionamiento de los mercados diario e intradiario de producción de energía eléctrica.* (2018). En línia: http://www.omie.es/files/PRESENTACION_REGLAS_MAY2018.pdf

